



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

“DISEÑO DEL SISTEMA DE POTENCIA DE UN PROTOTIPO DE VEHÍCULO MEDIANTE EL USO DE ENERGÍA SOLAR PARA LA COMPETENCIA DE VEHÍCULOS WORLD SOLAR CHALLENGE.”

JHONNY OMAR ARMIJOS JARAMILLO

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

RIOBAMBA – ECUADOR

2017

ESPOCH

Facultad de Mecánica

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

2016-12-05

Yo recomiendo que la tesis preparada por:

JHONNY OMAR ARMIJOS JARAMILLO

Titulada:

**“DISEÑO DEL SISTEMA DE POTENCIA DE UN PROTOTIPO DE
VEHÍCULO MEDIANTE EL USO DE ENERGÍA SOLAR PARA LA
COMPETENCIA DE VEHÍCULOS WORLD SOLAR CHALLENGE.”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

Ing. Carlos José Santillán Mariño
DECANO FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Ligia Elena Moreno Pinduisaca.
TUTOR

Ing. Celin Abad Padilla Padilla.
ASESOR

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: JHONNY OMAR ARMIJOS JARAMILLO

TRABAJO DE TITULACIÓN: “DISEÑO DEL SISTEMA DE POTENCIA DE UN PROTOTIPO DE VEHÍCULO MEDIANTE EL USO DE ENERGÍA SOLAR PARA LA COMPETENCIA DE VEHÍCULOS WORLD SOLAR CHALLENGE.”

Fecha de Examinación: 2017-05-15

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. José Francisco Pérez Fiallos PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Ligia Elena Moreno Pinduisaca TUTOR			
Ing. Celin Abad Padilla Padilla. ASESOR			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. José Francisco Pérez Fiallos
PRESIDENTE TRIB. DEFENSA

DERECHOS DE AUTORÍA

El Trabajo de Titulación presentado, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica estipulado en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Armijos Jaramillo Jhonny Omar

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Armijos Jaramillo Jhonny Omar, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría, de igual manera los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente referenciados y citados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Armijos Jaramillo Jhonny Omar
Cedula de Identidad: 190050348-1

DEDICATORIA

Quiero dedicar este logro primeramente a Dios, por brindarme la sabiduría y fortaleza ya que gracias a él he logrado culminar una etapa en mi carrera.

A mis padres Pedro y Doris, por ser el pilar fundamental y el apoyo incondicional en mi formación como profesional, por brindaron su apoyo, consejos, oportunidad y recursos para lograrlo.

De igual forma a todos mis maestros, familiares y amigos quienes fueron parte importante en mi formación académica, de manera indirecta me brindaron su apoyo, me alentaron a seguir adelante y cumplir mi anhelo.

JHONNY OMAR ARMIJOS JARAMILLO

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por darme la sabiduría y fortaleza, a mis padres, hermanos y familiares que me brindaron su apoyo moral, económico para lograr el objetivo trazado ya que son el pilar fundamental de este logro.

A la Escuela de Ingeniería Automotriz, a la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por abrirme sus puertas y permitir mi formación profesional.

De manera muy especial al Ing. Bolivar Cuaica, y a la Ing. Ligia Moreno, quienes con su asesoría y dedicación fueron parte de este logro importante.

JHONNY OMAR ARMIJOS JARAMILLO

CONTENIDO

Pág.

CAPÍTULO I

1. MARCO REFERENCIAL

1.1	Introducción.....	1
1.2	Problematización	3
1.3	Justificación	4
1.4	Alcance	6
1.5	Objetivos.....	7
1.5.1	<i>Objetivo general.</i>	7
1.5.2	<i>Objetivos específicos:</i>	7
1.6	Planteamiento de la hipótesis	7
1.7	Marco teórico.....	7
1.7.1	<i>Energía solar</i>	7
1.7.2	<i>Energía Solar Fotovoltaica</i>	11
1.7.3	<i>Carrera Solar de Atacama</i>	12
1.7.4	<i>Vehículos solares</i>	13
1.7.5	<i>Demanda energética</i>	22
1.7.6	<i>Capacidad de energía disponible en el sistema</i>	23
1.7.7	<i>Parámetros físicos de influencia en la radiación solar</i>	24
1.7.8	<i>Matriz fotovoltaica</i>	25
1.7.9	<i>Almacenamiento de la energía</i>	27
1.7.10	<i>Inversión de la energía</i>	29
1.7.11	<i>Sistema de potencia</i>	30
1.7.12	<i>Pruebas de inspección técnica</i>	35

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA

2.1	Diseño metodológico	36
2.1.1	<i>Especificaciones de diseño</i>	36
2.2	Matriz de involucrados	38
2.3	Árbol de problemas	39

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS

3.1	Datos de radiación solar	40
3.2	Parámetros de diseño	45
3.2.1	<i>Demanda energética</i>	45
3.2.2	<i>Capacidad de energía disponible en el sistema</i>	45
3.2.3	<i>Selección de Paneles fotovoltaicos</i>	47
3.2.4	<i>Baterías</i>	49
3.2.5	<i>Inversor</i>	50
3.2.6	<i>Motor</i>	51
3.2.7	<i>Mecanismo de transmisión</i>	52
3.2.8	<i>Presupuesto</i>	53
3.3	Conclusiones.....	54
3.4	Recomendaciones	55

BIBLIOGRAFÍA	82
---------------------------	----

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1. Distribución espectral de la radiación solar.	9
2. Tipo de baterías de almacenamiento para los vehículos evolución.	20
3. Máxima profundidad de descarga en función del tipo de batería.	28
4. Rendimiento de inversores según el tipo.	30
5. Diseño metodológico	36
6. Especificaciones de diseño vehículo evolución para la CSA.	36
7. Involucrados en el proyecto.	38
8. Características topográficas del sitio escogido.	40
9. Radiación incidente en plano horizontal.....	43
10. Capacidad de energía disponible según la matriz FV.....	46
11. Potencia requerida para la matriz FV.	47
12. Alternativas de paneles fotovoltaicas utilizables para el auto solar evolución...	48
13. Alternativas de baterías solares para el almacenamiento energético.	49
14. Alternativas de baterías solares para el almacenamiento energético.	50
15. Alternativas de motores eléctricos para vehículo solar.	51
16. Pares referenciales de rodadura y de superación de pendientes.	52
17. Presupuesto de adquisición de los componentes del vehículo solar evolución. .	53

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1. Vehículo evolución en la Carrera Solar Atacama.....	12
2. Recorridos y puntos de control de la Carrera Solar Atacama.....	13
3. Diagrama representativo del funcionamiento del auto solar.	14
4. Esquema del asiento del vehículo con el apoya cabezas.	15
5. Visión trasera requerida.	16
6. Vista superior y lateral requeridos.	17
7. Accionador de elemento de desconexión.....	21
8. Azimut e inclinación en un panel solar.....	25
9. Esquema de los componentes para superar un andén.	34
10. Árbol de problemas de la investigación.....	39
11. Mapa del sitio seleccionado.....	41
12. Configuración del sistema fotovoltaico.	42
13. Ciclo diarios de radiación.	44
14. Ciclo diarios de radiación por año.	44
15. Arreglo con módulos FV conectados en serie.	48

SIMBOLOGÍA

SÍMBOLO	MAGNITUD	UNIDAD
a	Aceleración	m/s^2
A_c	Área geométrica de cada una de las celdas	m^2
A_d	Área geométrica disponible para las celdas	m^2
A_i	Área instalada	m^2
A_p	Área del panel	m^2
C_{bat}	Capacidad de las baterías	$A \cdot h$
C_e	Capacidad de energía disponible	$\frac{kW \cdot h}{día}$
C_i	Capacidad instalada	$\frac{kW}{m^2}$
C_{rr}	Coeficiente adimensional de resistencia a la rodadura	adimensional
d_a	Días de autonomía	días
D_e	Demanda energética	$\frac{kW \cdot h}{m^2 \cdot día}$
E_n	Eficiencia nominal	adimensional
F	Fuerza	N
G	Irradiancia	W/m^2
g	Aceleración de la gravedad	m/s^2
hp	Caballos de fuerza	hp
\bar{H}_T	Media mensual de radiación diaria sobre la superficie del módulo fotovoltaico	$\frac{W \cdot h}{m^2 \cdot día}$
H_s	Media mensual diaria de radiación sobre una superficie horizontal	$\frac{W}{m^2}$
I	Momento de inercia	$kg \cdot m^2$
J	Joule	J
m	Masa del vehículo	M
n	Velocidad angular	Rpm
n_p	Número de paneles	Kg
P	Potencia	W Vatios
P_{NOM}	Potencia nominal	V · A
R	Radio de la rueda	M
t	Tiempo estimado de uso por día	h/día
T_A	Par aerodinámico	N.m
T_a	Par de aceleración	N.m
T_e	Par en el eje de la rueda	N.m
T_R	Par de rodadura	N.m
T_f	Par de fricción	N.m

SÍMBOLO	MAGNITUD	UNIDAD
T_{sp}	Par superación de pendientes	N.m
T_{so}	Par de superación de obstáculos	N.m
W	Peso del vehículo	N
W_p	Potencia pico del módulo fotovoltaico	W
v	Velocidad lineal	m/s o km/h
V	Voltios	V
V_s	Voltaje o tensión del sistema	V

LISTA DE ABREVIACIONES

CSA	Carrera Solar Atacama
ESPOCH	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
FV	Fotovoltaica
NOC	Máximo número de ciclos de carga y descarga
PdD	Profundidad de descarga de una batería
SI	Sistema Internacional de Unidades
UR	Infrarroja
UV	Ultravioleta

LISTA DE ANEXOS

- A** Diagramas Referenciales de Configuración Básica de Barras Antivuelco
- B** Medición estándar del ángulo del asiento
- C** Especificaciones del volante
- D** Catálogo de paneles fotovoltaicos
- E** Catálogo de baterías
- F** Catálogo de inversores

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue el “Diseño del sistema de potencia de un prototipo de vehículo mediante el uso de energía solar para la competencia de vehículos World Solar Challenge”. Se establecen los parámetros de dimensionamiento de un auto solar de competición categoría evolución, que tiene la particularidad que la única fuente de energía proviene de la radiación solar. Con el objeto de disponer de datos de irradiancia y de la energía que se puede captar y almacenar, se obtuvieron datos para la región de Atacama en Chile, lugar que presenta la radiación más elevada del planeta. Además se revisó las bases técnicas de la competición, en donde se establecen los parámetros a los cuales tienen que acogerse todos los participantes. El diseño de un vehículo solar que cumpla las disposiciones de la organización amerita tomar en cuenta varios criterios, partiendo de los componentes, desde la captación energética solar mediante una matriz fotovoltaica de silicio, la posterior conversión a energía eléctrica de corriente continua, la que se almacena mediante el empleo de baterías de Ión-Litio o de Plomo-ácido, lo que permite que el vehículo pueda movilizarse en condiciones de irradiación insignificante, seguidamente la energía eléctrica es convertida a corriente alterna empleando un inversor, de ese modo ya se puede suministrar directamente a un motor eléctrico de torque importante, es recomendable que sea entre 1 y 3 hp. En el presente trabajo se establecieron todos los parámetros de diseño, mediante la formulación de alternativas que se pueden considerar para la implementación de este tipo de autos, sobre todo considerando que existe el interés de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de participar en esta carrera en representación del país, para lo cual es imperioso que se acojan todas las disposiciones de la organización del evento y contar con los elementos técnicos necesarios para asegurar una representación digna, dado que los participantes provienen de todo el mundo y el nivel es muy competitivo.

PALABRAS CLAVE: <CARRERA SOLAR>, <PANEL FOTOVOLTAICO>, <MOTOR ELÉCTRICO>, <TORQUE>, <ENERGÍA SOLAR>, <VEHÍCULO SOLAR>.

ABSTRACT

The objective of the research was to “Design the power system of a vehicle through the use of solar energy to the competition of vehicles World Solar Challenge”, setting the parameters of dimensioning of a solar vehicle of competition category evolution which has the particularity of that the only source of energy to the operation comes from solar radiation. In order to obtain data of irradiation and of the energy that can be captured and stored, the data were obtained to the Atacama region in Chile, which presents the highest values of radiation on the planet. In addition, the technical bases of the race were revised in which the parameters are established to which all the participants have to be accepted. The design of a solar vehicle that adapts to the dispositions of the organization deserve taking into account various criteria, starting from the components that go from the solar energetic capture by means of a photovoltaic matrix of silicon, the subsequent conversion to electrical energy of direct current, which is stored through the use of lithium-ion or lead-acid batteries, allowing the vehicle to be able to mobilize in insignificant irradiation conditions, followed the electric energy is converted to alternating current using a power inverted, in this way, it is possible to use and electric motor with important torque, it is recommended that that it be between 1 and 5 hp. In the present study all the parameters of design were established, through the formulation of alternatives that can be considered to the implementation of this type of cars, especially considering that there is the interest of the Escuela Superior Politécnica de Chimborazo in take part in this race in representation of the country, for this reason, it is imperative that all dispositions of the race organization are accepted and they have the necessary technical elements to ensure a dignified representation because the participants come from all the world and the level is very high competitive.

KEY WORDS: <SOLAR RACE>, <PHOTOVOLTAIC PANEL>, <ELECTRIC MOTOR>, <TORQUE>, <SOLAR ENERGY>, <SOLAR VEHICLE>.

CAPÍTULO I

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 Introducción

El presente proyecto de investigación tiene como ámbito de interés la Carrera Solar de Atacama, para la cual se diseña el prototipo de vehículo mediante el uso de la energía solar.

Esta competición es un evento internacional que tiene como objetivo principal el impulsar el uso de la energía solar, como un recurso potencialmente aprovechable para el funcionamiento de los vehículos, en sitios donde el potencial de radiación es considerable. A través de esta competición se promociona el desarrollo de vehículos que tengan autonomía de movimiento y que no requieran del uso de combustibles fósiles.

Por otro lado, el hecho de ser una carrera hace que los fabricantes se vean en la obligación de mejorar las características de los autos solares, en cuanto a niveles de eficiencia, materiales, costos de fabricación, entre otros aspectos que han representado un problema para la masificación de este tipo de vehículos. Por esa razón se puede manifestar que el mencionado evento es pionero y de gran importancia y es una necesidad de que el Ecuador esté presente y pueda ser parte del desarrollo de la industria de los autos solares.

“El desarrollo de las carreras de coches fotovoltaicos se remonta a 1980, cuando dos australianos, Hans Tholstrup y Larry Perkins, construyeron el primer coche impulsado por energía solar”. (Instituto Tecnológico de Canarias S.A., 2007)

La primera carrera oficial de vehículos fotovoltaicos “El Tour del Sol” tuvo lugar en Suiza en 1985, la cual se ha repetido regularmente. La que más destacó de esta modalidad automovilística fue la World Solar Challenge (1987), que une a la localidad de Darwin y la ciudad de Adelaida, en una travesía de cerca de 3 000 km, a través del territorio Australiano. (Instituto Tecnológico de Canarias S.A., 2007)

Por otra parte, la Carrera Solar Atacama es la más conocida competencia de vehículos solares de Latinoamérica, tiene lugar en el Desierto de Atacama en Chile, el más árido del mundo, que presenta los más elevados niveles de irradiación solar de la superficie de la Tierra, además de una geografía imponente.

La mencionada competición reúne a equipos provenientes de varios países, con el propósito de generar innovación e investigación en tecnologías fotovoltaicas, contribuir al desarrollo de la movilidad y apoyar a los emprendedores, con base en la importancia que tienen las energías renovables, al ser impulsoras de un estilo de vida más sustentable.

La competencia es organizada por la ONG La Ruta Solar, que propone cambios tecnológicos sustentables en la sociedad, mediante el apoyo e impulso a las iniciativas y proyectos que estimulen el emprendimiento de jóvenes líderes, donde los pilares fundamentales son las energías renovables y la preservación del medio ambiente. Hasta la presente fecha se han realizado cuatro ediciones de la competencia y se cuenta con dos categorías de vehículos: la evolución y los híbridos.

Para la categoría evolución los vehículos son impulsados solamente por la energía solar, presentan un diseño completamente aerodinámico y emplean componentes de última tecnología. Esta categoría se enfoca en desarrollar la eficiencia de los vehículos solares para que alcance valores aceptables y a grandes velocidades. El vehículo evolución consta de 4 ruedas para un ocupante e incluye algunas prestaciones que lo asemejan a un vehículo convencional, entre ellas que su habitáculo se encuentra más centrado y provee ergonomía al conductor.

Por otra parte, la categoría de vehículos híbridos es la que emplea la energía eléctrica y la fuerza del hombre para propulsarse. Apunta a desarrollar vehículos no contaminantes y a bajo costo, ampliando la participación en Carrera Solar Atacama (CSA) a equipos con financiamiento limitado. Estos vehículos pueden portar hasta 2 personas (conductor y pasajero), disponen de pedales y no tienen celdas solares incorporadas, sino que requieren una estación de carga solar externa.

En su última edición la ruta de la carrera fue de 2 300 km para la categoría evolución y de 750 km para los híbridos. En el recorrido se cuenta con paradas denominadas Puntos

de Control y tramos, así como también la organización ha establecido reglas específicas y obligatorias para los participantes.

Constituyen de particular interés la topografía del terreno y el estado material del pavimento. En el caso de la primera se presentan tramos de considerable desnivel con grandes pendientes, así como en el segundo caso su condición es muy variable. Por esta razón los vehículos participantes deben estar diseñados para el trabajo en las mencionadas condiciones y además todos los vehículos participantes deben respetar la Ley de Tránsito chilena y las disposiciones de la organización.

En Ecuador ya se han propuesto vehículos con este fin, particularmente existe el caso de una tricicleta híbrida impulsada por energía solar, construida como trabajo de grado de un estudiante de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. (Ramírez 2015)

Por esta razón es deseable que las Instituciones de Educación Superior del país en general y particularmente la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) impulse el diseño de vehículos que puedan participar en esta competición, lo que permitirá que Ecuador se involucre activamente en la evolución de los vehículos solares.

La ESPOCH, como una institución de nivel superior orientada a cumplir altos estándares de calidad, y la Facultad de Mecánica, como la encargada en formar a los profesionales técnicos en la rama automotriz, se han planteado el desafío de ser participantes en la mencionada competición. Por lo cual es necesario proponer el diseño de un prototipo que responda a las exigencias de la Carrera Solar Atacama.

Por este motivo, se demanda en primer lugar de un estudio que haga factible la ejecución del proyecto, que pretende sustentar técnicamente la implementación de un vehículo solar que participe en la referida competencia. Se propone el diseño del prototipo para la categoría evolución en conformidad con las especificaciones técnicas requeridas por parte de la organización de la competición.

1.2 Problematicación

El limitante principal en la vida útil de los vehículos solares con paneles fotovoltaicos, reside en el aprovechamiento de la potencia, la vida útil de una celda comercial típica

puede llegar hasta los 25 años, que equivale a tener una vida útil en las celdas hasta 5 veces mayor que en la etapa de potencia. Otro aspecto relacionado es la eficiencia, a partir de la relación entre la potencia disponible (que proviene de la radiación solar captada) y la potencia efectiva o aprovechable para el movimiento del vehículo.

Otros aspectos que condicionan la masificación de los autos solares son los que se enumeran a continuación: El costo de producción y de operación de los autos solares, la disponibilidad de accesorios, repuestos y estaciones de carga, el almacenamiento de la energía captada por los paneles fotovoltaicos, las limitaciones de conocimiento de los técnicos ecuatorianos en materia de vehículos solares, entre otros.

Por esta razón es imperioso hacer un estudio que establezca las bases o parámetros que se tienen que considerar para la implementación de autos solares, cuyo objetivo sea participar en la competencia de vehículos solares de Latinoamérica, para posteriormente ser aplicables también al medio local.

1.3 Justificación

Hoy en día está tomando un notable auge el diseño de sistemas basados en energías limpias y de emisión cero, conocidas como energías alternativas, que son consideradas como renovables, por su carácter inagotable. En este sentido, en el Ecuador se viene impulsando el cambio de la matriz productiva y energética, a través de los ejes que contemplan el reconocimiento de 14 sectores productivos y 5 industrias estratégicas, precisamente dos de los sectores de interés son, el desarrollo de las energías renovables y la industria de los vehículos. (SENPLADES, 2012, p.15)

Por esta razón, el proyecto de investigación se orienta en contribuir en la profundización de los estudios de carácter técnico con respecto a los sistemas de potencia de vehículos basados en la utilización de energía solar, como una propuesta a la movilidad sustentable.

Adicionalmente, la captación de energía solar puede ser utilizada para la movilidad de personas siempre y cuando se cuente con sistemas idóneos en cuanto a la eficiencia energética y que al mismo tiempo dispongan de medios de almacenamiento adecuados. La aplicación más conocida corresponde a los autos solares, que son vehículos que captan

la energía térmica proveniente del Sol mediante paneles fotovoltaicos, almacenan dicha energía y la convierten en movimiento.

Paralelamente, como una forma de promocionar el desarrollo de los autos solares, se viene realizando la Carrera Solar Atacama en Chile desde el año 2011, hasta el momento han tenido lugar cuatro versiones (aproximadamente una por año), este evento es una competencia de autos solares, la misma que se realiza en el desierto de Chile, lugar que registra una media de 275 W/m^2 . (Bishop y Rossow, 1991)

El proyecto de investigación consiste en la formulación de alternativas para el diseño de un sistema de potencia de un prototipo de vehículo, que funcione mediante el uso de la radiación solar y para que participe en la competencia de vehículos solares de Latinoamérica denominada Carrera Solar Atacama, con sede en el norte de Chile.

Bajo esa perspectiva, es deseable realizar un estudio que permita establecer los parámetros inherentes al diseño de un vehículo de carreras que utilice la energía solar, con el objeto de que tenga una buena eficiencia para que participe dignamente en el certamen.

En términos generales el presente proyecto pretende beneficiar el avance tecnológico del país con el uso de la energía solar, que es factible con un auto solar que tenga autonomía completa. De esta forma, se contribuye directamente para la preservación del ambiente, dado que este tipo de energía es renovable y no contaminante. Además desde el punto de vista particular, los beneficiarios del estudio que se propone, serán los estudiantes de la ESPOCH y demás instituciones educativas a nivel superior, porque podrán contar con información técnica para la posterior construcción de autos solares o implementación de sistemas similares que funcionen mediante la captación de energía solar.

Además a futuro, se espera que se beneficie toda la comunidad, ya que se podrán disponer de auto o vehículos que cuenten con una alternativa energética, la cual puede ser accesible para aplicaciones como competencias, paseos y transporte entre distancias cortas.

La importancia de la investigación radica en que es fundamental contar con el sustento técnico para la construcción de este tipo de vehículos, considerando que es imprescindible

disponer de información previo la ejecución de proyectos que sea aplicables en la práctica.

El estudio que se plantea es factible, porque corresponde al campo de la Ingeniería Automotriz y se centra en un área de interés dentro del fomento al cambio de la matriz productiva del país. Desde el punto de vista económico también es viable, ya que el autor está en capacidad de cubrir el egreso necesario para la ejecución del mismo.

1.4 Alcance

En base al contexto de la problemática existente y del tema de interés, se establecen como parámetros de interés los siguientes:

El dimensionamiento del sistema, la selección de componentes en función de las necesidades, la potencia de operación requerida, la disponibilidad energética, los medios de almacenamiento de la energía, la conversión de energía térmica a eléctrica, los materiales a utilizar, las necesidades de espacio para conducción, el arranque y dirección del vehículo, el tiempo de carga, entre otros.

Además de los aspectos señalados, que son de índole general, también corresponde revisar las características bajo las cuales se diseñan los vehículos solares de carreras. Es decir, es imprescindible adentrarse en las condiciones propias de la Carrera Solar Atacama.

Otro aspecto inherente a las consideraciones técnicas y tecnológicas es la revisión de la normativa vigente en el país y en el mundo en referencia a vehículos y sistemas de aprovechamiento de la energía solar. En ese sentido, es pertinente revisar la norma:

NTE INEN-IEC/TS 61836 (2013) Sistemas de energía solar fotovoltaica – Términos definiciones y símbolos.

Por otro lado, debido a que el proyecto se dirige a la Carrera Solar Atacama, localizada en Chile, es pertinente observar la información proveniente del Atlas Solar de Chile elaborado por las empresas Abengoa Solar y Abengoa Chile, la Dirección Meteorológica y el Instituto Geográfico Militar.

1.5 Objetivos

1.5.1 *Objetivo general.*

Diseñar el sistema de potencia de un prototipo de vehículo mediante el uso de energía solar para la Carrera Solar Atacama.

1.5.2 *Objetivos específicos:*

- Estudiar los sistemas de captación de energía solar mediante la revisión bibliográfica y de los antecedentes investigativos, para determinar los parámetros que intervienen en el aprovechamiento energético.
- Establecer las especificaciones de los paneles solares con base en la eficiencia energética, para definir la potencia requerida en la operación del vehículo solar de competencia.
- Determinar las características del motor eléctrico, inversor y tipos de baterías a ser implementadas, con la finalidad de proponer el diseño de un vehículo a energía solar-eléctrica que maximice la eficiencia y la potencia en la Carrera Solar Atacama.

1.6 Planteamiento de la hipótesis

El diseño del sistema de potencia de un prototipo de vehículo eléctrico permitirá maximizar su eficiencia mediante el uso de energía solar para la competencia de vehículos solares de Latinoamérica.

1.7 Marco teórico

1.7.1 *Energía solar*

La energía solar es recolectada a partir de la luz y el calor provenientes del Sol. Este fenómeno implica la absorción de la irradiación mediante dispositivos ópticos.

Es una energía renovable, conocido como limpia o energía verde. No obstante, los paneles fotovoltaicos al final de su vida útil son un residuo contaminante difícil de reciclar.

La densidad de energía promedio proveniente de la radiación solar fuera de la atmósfera es de aproximadamente $1\,366\text{ W/m}^2$, comúnmente a esta magnitud se la conoce como “constante solar”.

Al tener en cuenta el área de la corteza terrestre, se estima que la potencia en la superficie terrestre es de $1.73 \times 10^{17}\text{ W}$, con esa tasa la energía solar es de $5.46 \times 10^{24}\text{ J}$. (Chen, 2011 p. 1)

Otro hecho a considerar es que, la radiación que alcanza la superficie varía en el transcurrir del día, por las condiciones atmosféricas y por la latitud. Se puede asumir que, en una situación ideal el valor de irradiación puede alcanzar $1\,000\text{ W/m}^2$ en la superficie terrestre.

1.7.1.1 Radiación solar e Irradiación. Es la energía electromagnética solar en forma de luz y calor, que se transfiere en el espacio y se recibe en los cuerpos celestes localizados a una cierta distancia de dicho astro.

El sol es una esfera de unos $700\,000\text{ km}$. de radio, distante de la tierra a una media de $1.495 \times 10^{11}\text{ km}$. A su vez, está conformado por una mezcla de gases, como hidrógeno y helio, en su núcleo se producen reacciones de fusión, que son su fuente de energía y que mantienen su núcleo a una temperatura elevada, entre 8×10^6 y $40 \times 10^6\text{ K}$. Una porción de esta energía fluye hacia las capas externas y al espacio por mecanismos de convección y radiación. Para uso energético se puede considerar como una esfera que emite una radiación transmisible a través del espacio a la velocidad de la luz. (Abal, 2012 p. 25)

La distribución de espectro de intensidad de radiación solar cubre las siguientes bandas de frecuencias: Radiación ultravioleta UV u ondas cortas desde 100 a 400 nm , radiación visible en el rango de 400 nm (luz violeta) a 770 nm (luz roja) y radiación infrarroja IR u ondas largas desde 770 nm a $4\,000\text{ nm}$. Además la radiación ultravioleta se subdivide en A, B y C, en tanto que el infrarrojo se subdivide en cercano y lejano.

A continuación se presenta una tabla:

Tabla 1. Distribución espectral de la radiación solar.

BANDA	SIGLA	LONGITUD DE ONDA
Ultravioleta C	UVC	0,100-0,280
Ultravioleta B	UVB	0,280-0,315
Ultravioleta A	UVA	0,315-0,400
Visible	VIS	0,400-0,770
Infrarrojo cercano	NIR	0,770-1,5
Infrarrojo lejano	FIR	1,5-15

Fuente: Abal (2012).

Otro aspecto importante a destacar es que, el término radiación se aplica a un cuerpo que radia, en este caso el Sol; mientras que irradiación es la acción de recibir la radiación, como la Tierra, que recepta la energía del Sol. Por esta razón, la superficie terrestre es irradiada y el fenómeno propiamente dicho corresponde a irradiación solar.

En la práctica la irradiación solar se descompone en directa, indirecta, reflejada, difusa y esparcida en la atmosfera. (Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-11 Capítulo 14. Energías Renovables, 2011)

1.7.1.2 Irradiancia. Generalmente al referirse a la irradiación solar, se habla de la energía que emite el Sol sobre un metro cuadrado de superficie terrestre. La magnitud física utilizada para cuantificar dicha magnitud en la Tierra se denomina irradiancia.

En este sentido, irradiancia representa la velocidad de flujo o potencia radiante del Sol que incide en una unidad de área, el flujo a su vez se descompone en energía por unidad de tiempo. La unidad de medición en el Sistema Internacional de Unidades es el (W/m^2). Para la medición existen instrumentos mecánicos tales como: piranómetros, solarímetros, pirheliómetros y otros.

1.7.1.3 Dirección de incidencia de la irradiación solar. La dirección con la que incide la irradiación sobre los cuerpos localizados en la superficie de la Tierra, es de importancia si se desea conocer su comportamiento al ser reflejada, que depende de los tipos de irradiación, especialmente de las radiaciones directa y difusa.

1.7.1.4 Irradiación Solar Directa. Es la radiación que se transmite a la superficie terrestre en forma de rayos provenientes del Sol, sin experimentar cambios de dirección, sin dispersión, absorción, sin reflexiones o refracciones intermedias. Tiene la ventaja de que puede reflejarse y ser concentrada para su utilización.

1.7.1.5 Irradiación Solar Difusa. Es la radiación que llega a la Tierra, luego de experimentar dispersión por las nubes, el polvo u otros elementos de la atmosfera. Es decir, proviene de otras direcciones diferentes a las del disco solar, debido a la reflexión, refracción y dispersión de la radiación solar al atravesar la atmósfera y las nubes. (Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-11 Capítulo 14. Energías Renovables, 2011)

Debido a las características de la irradiación solar difusa, la luz se considera proveniente de todas direcciones, por ello no es posible concentrarla.

1.7.1.6 Irradiación Solar Global

Es la suma de las irradiaciones directa y difusa. El flujo de la irradiación está en función del ángulo que forman la normal a la superficie en un determinado punto y la dirección de incidencia de los rayos. En virtud de la gran distancia del Sol respecto de la Tierra, se puede estimar que los rayos inciden esencialmente paralelos sobre el planeta. Sin embargo, en cada punto del mismo, a nivel local, la inclinación de la superficie con relación a los rayos depende de la latitud, así como también de la hora, para una determinada localización en longitud.

1.7.1.7 Horas de Sol. Corresponde al número de horas de sol a $1\,000\text{ W/m}^2\cdot\text{dia}$ que incide sobre una superficie. Por ejemplo: 4,5 horas de sol = $4,5\text{ kWh/m}^2\cdot\text{dia}$.

1.7.1.8 Sistemas de aprovechamiento de la energía solar. Existen dos tipos de sistemas de aprovechamiento de la energía solar:

Sistema solar pasivo. Tienen fundamento en el uso de la energía solar de forma directa, sin requerir de sistemas mecánicos ni el aporte externo de energía, además no se realiza transformación de la forma de la energía. (Energías Alternativas. Guía Básica, 2011)

Sistema solar activo. Es el sistema solar que recoge la energía por dispositivos artificiales denominados colectores solares, transformándola en energía térmica o de generación de eléctrica mediante la conversión fotovoltaica utilizando celdas fotovoltaicas. La transferencia de calor es por medio de componentes mecánicos, de igual manera el almacenamiento y distribución funcionan con ayuda de dispositivos y equipos exteriores. El almacenamiento energético puede tener lugar por cualquiera de los mecanismos: calor sensible, cambio de fase, reacciones químicas y estanques solares. (Gudiño, 1995)

1.7.2 *Energía Solar Fotovoltaica*

Es un tipo de electricidad renovable, obtenida de la captación de la radiación solar. Su denominación implica la obtención de energía eléctrica a partir de los rayos del Sol.

Esta energía se basa en el principio de la foto detección cuántica de un dispositivo; regularmente este dispositivo es una lámina metálica con características semiconductoras denominada célula fotovoltaica o mediante una deposición de metales sobre un sustrato llamado capa fina.

La energía solar fotovoltaica permite la generación de corriente eléctrica continua a través del uso de semiconductores, cuando los mismos son iluminados por un haz de fotones. Mientras la luz actúa sobre una célula solar (elemento fotovoltaico individual) se genera potencia eléctrica, en el momento que la luz solar se extingue, la electricidad desaparece.

La principal ventaja de las células solares es la vida útil, pueden estar en operación hasta por 30 años (Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación de Madrid, 2002). En la actualidad las aplicaciones fotovoltaicas son tan diversas que van, desde el suministro de corriente para electrodomésticos, hasta la alimentación a las redes de distribución de energía eléctrica.

Los dispositivos fotovoltaicos se forman por un cristal en forma de lámina transparente en la parte superior y en el lado inferior por un cerramiento, entre los que se encapsula un sustrato conversor y las conexiones eléctricas. Precisamente, los módulos fotovoltaicos proporcionan corriente eléctrica continua, transformable en corriente alterna, por medio

de la utilización de un aparato electrónico denominado inversor de corriente, para posteriormente suministrar energía a la red eléctrica.

Los sistemas fotovoltaicos se pueden agrupar de varias maneras, de donde se diferencian entre sistemas aislados, sistemas de conexión a red y sistemas híbridos.

1.7.3 *Carrera Solar de Atacama*

Es una competición de autos solares e híbridos que se desarrolla en el Desierto de Atacama en Chile, sitio que dispone de los más altos niveles de irradiación solar de la superficie de la Tierra, además de una geografía imponente. Los equipos participantes provienen de varios lugares del mundo y se efectúa con la finalidad de impulsar la utilización de las tecnologías fotovoltaicas y su desarrollo en beneficio de la movilidad.

La Carrera Solar Atacama es de reciente creación, pues empezó en el año 2011. Hasta el momento han tenido lugar cuatro ediciones de la competición, en las que el recorrido se ha modificado ligeramente. Así también existen dos categorías de vehículos: la Evolución y los Híbridos.

1.7.3.1 *Categoría Evolución.* Son impulsados únicamente por energía solar, presentan un diseño aerodinámico para un ocupante y utilizan componentes que permiten alcanzar altas velocidades sobre cuatro ruedas. En la siguiente figura se aprecia un ejemplar de esta categoría.

Figura 1. Vehículo evolución en la Carrera Solar Atacama.



Fuente: <https://www.carrerasolar.com/c/carrera-solar/nosotros>

1.7.3.2 *Categoría Híbridos.* Estos vehículos son de bajo costo y para propulsarse trabajan con la energía eléctrica, complementada por la fuerza del hombre. Aportan positivamente al medio ambiente y requieren disponer de una estación de carga solar

externa. A diferencia de la categoría evolución, los vehículos híbridos pueden tener capacidad para dos ocupantes.

1.7.3.3 Recorrido. El recorrido de Carrera Solar Atacama se concentra en las primeras regiones de Chile (al norte), en la última edición se sumó a la región de Atacama con el paso por la ciudad de Chañaral, abarcando el corazón del Desierto de Atacama y cubriendo todos sus escenarios. La carrera tiene lugar en 5 días de competencia y una jornada libre.

Figura 2. Recorridos y puntos de control de la Carrera Solar Atacama.



Fuente: <http://www.geminis.cl/carrera-solar-atacama#recorrido>

La ruta de la carrera para la categoría Evolución es de 2 300 km y para los Híbridos de 750 km. Se compone de paradas denominadas Puntos de Control y 3 tipos de tramos, conforme se describe a continuación: Tramo cronometrado, que debe ser recorrido obligatoriamente por el vehículo en competencia y que se registra el tiempo. Tramo especial, que también es obligatorio pero sin cronometrarse. Tramo remolcado, no cronometrado, en que el vehículo es remolcado.

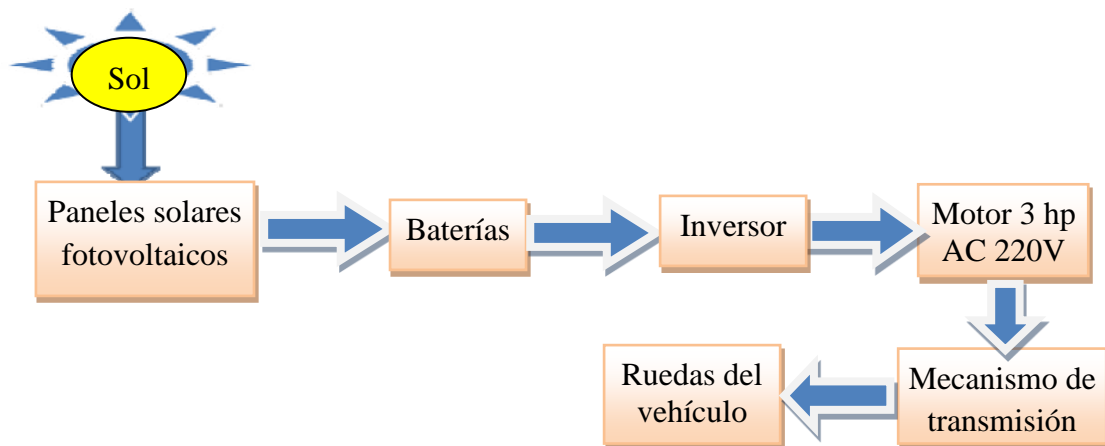
Para la categoría Evolución, el ganador es el equipo que recorre en el menor tiempo la totalidad de los kilómetros de competencia.

1.7.4 Vehículos solares

“Un vehículo solar es aquel que utiliza la energía solar fotovoltaica como fuente. La energía eléctrica obtenida del panel solar se convierte en energía mecánica, usando un motor”. (Moyano, y otros, 2006)

Uno de los aspectos más complicados en relación al funcionamiento de los autos solares es la eficiencia, es decir, aprovechar la máxima energía para el funcionamiento del vehículo, tomando en consideración que la radiación solar no es constante, ya que varía ostensiblemente en el día y en la noche es nula. El funcionamiento del vehículo solar obedece a la estructura indicada en la figura 3, en la que se detallan los principales componentes:

Figura 3. Diagrama representativo del funcionamiento del auto solar.



Fuente: (Sunil, y otros, 2010)

La organización de la Carrera Solar de Atacama (2016).tiene establecidas las “Bases Técnicas” para los vehículos Evolución y para los Híbridos. En el mencionado documento se describen las características técnicas y especificaciones que tienen que tener los autos de competencia, para cada una de sus partes.

1.7.4.1 Chasis

En el chasis los vehículos deben incorporar barras estructurales antivuelco, conforme se detalla en el Anexo A.

1.7.4.2 Asientos

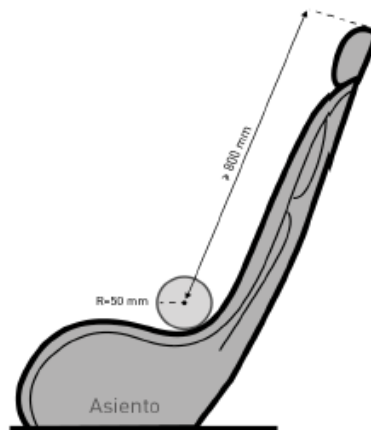
Con relación a los asientos, los vehículos deben cumplir los siguientes requisitos:

- Disponer de un asiento con al menos una base y un respaldo para que el ocupante apoye la espalda y que no lo sobrepase en altura en posición de conducción.

- La estructura del asiento tiene que ser solidaria a la rueda trasera.
- Es obligatorio el uso de un cinturón de seguridad por parte del ocupante. El cinturón será de fabricación comercial para automóviles, con al menos 3 puntos de sujeción a la estructura.
- El asiento tiene que disponer de un apoya cabeza a no menos de 80 cm desde el punto de referencia del asiento. En la figura 4 se presenta un esquema ilustrativo del apoya cabezas. Mientras que en el Anexo B se presenta la Medición estándar del ángulo del asiento.
- En posición de conducción, la disposición del asiento debe permitir que los talones del piloto se ubiquen bajo el extremo inferior de la base del asiento. Además, el ángulo formado entre sus hombros, caderas y rodillas debe ser mayor a 90° (ONG La Ruta Solar, 2016).

En la figura 4 se presenta un esquema del asiento del vehículo.

Figura 4. Esquema del asiento del vehículo con el apoya cabezas.



Fuente: Bases Técnicas CSA Evolución (2016)

1.7.4.3 Puertas y aperturas

- El diseño del vehículo debe permitir al ocupante entrar y salir sin ser asistido. Las puertas se deben poder abrir y cerrar desde dentro y fuera del vehículo.

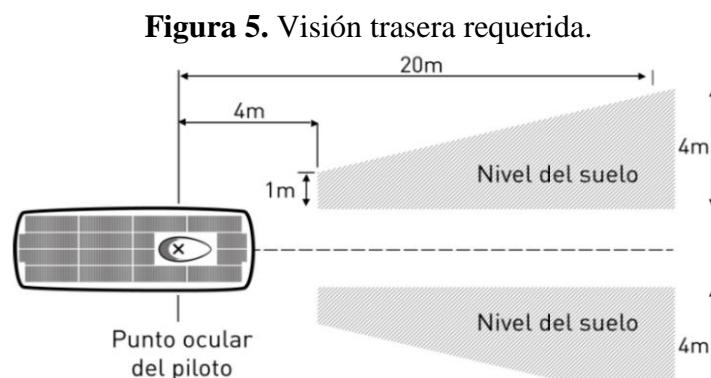
- El equipo debe demostrar que el ocupante esté en capacidad de entrar y salir del vehículo sin asistencia en máximo 10 segundos.
- No se permite asegurar una puerta o cubierta con cinta adhesiva de cualquier tipo.
- Las salidas de emergencia se tienen que indicar en el exterior del vehículo. (ONG La Ruta Solar, 2016)

1.7.4.4 Ventanas y Parabrisas

- Los materiales utilizados para las ventanas deben asegurar su máxima resistencia a la rotura.
- Las ventanas deben ser transparentes, para visualizar al ocupante desde el exterior. Se prohíben ventanas polarizadas o coloreadas. (ONG La Ruta Solar, 2016)

1.7.4.5 Visión

- La visión delantera del conductor debe ser clara. En este sentido, debe tener la capacidad de visualizar un objeto ubicado sobre el piso a 7 m del borde delantero. El conductor debe tener visión trasera clara sobre las áreas sombreadas, que se indican en el diagrama de la figura 5:

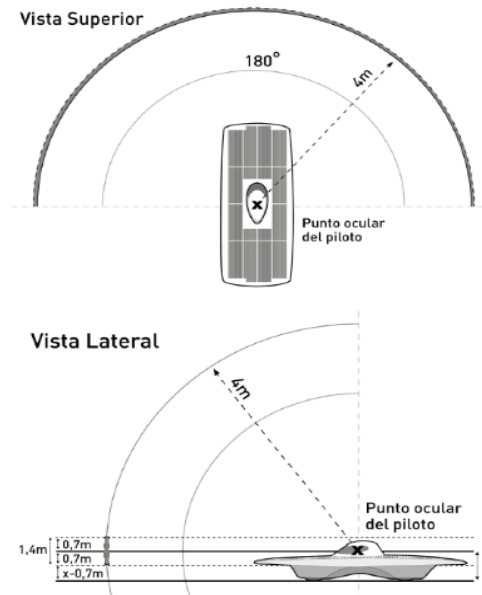


Fuente: Bases Técnicas CSA Evolución (2016)

- En el momento de la conducción del vehículo, la altura mínima de los ojos del ocupante debe estar 0,7 m sobre la carretera.

- El conductor debe poder divisar todo punto entre 0,7 m bajo y 0,7 m sobre el nivel de su vista a una distancia de 4 m desde su punto ocular, en todas direcciones hacia adelante. Esto corresponde a la superposición de las regiones sombreadas en los diagramas de la figura 6:

Figura 6. Vista superior y lateral requeridos.



Fuente: Bases Técnicas CSA Evolución (2016)

1.7.4.6 Funcionamiento

- El vehículo tiene que ser capaz de ser impulsado hacia adelante de manera autónoma y con el ocupante en posición de conducción, desde el momento de la partida y de igual manera hacia atrás.
- El hecho de empujar el vehículo durante un tramo cronometrado o especial de la competencia es penalizado con kilómetros.
- El vehículo solar debe poder arrancar desde el reposo en una pendiente de 14% sin ser empujado. Empujar se asume como el hecho de mover el vehículo de forma externa, con un mecanismo o fuente de energía no adherida.
- En las pruebas Clasificatorias, el vehículo debe completar, sin fallas eléctricas ni mecánicas, el circuito del autódromo de Alto Hospicio, el cual cuenta con un

recorrido de 1.8 km, y lo deberá hacer a una velocidad promedio no menor de 50 km/h. (ONG La Ruta Solar, 2016)

1.7.4.7 *Dirección*

- El sistema de dirección debe ser controlado mediante un volante de perímetro continuo, según lo indicado en el Anexo C.
- La columna de dirección del vehículo debe ser colapsable, para evitar su intrusión en el habitáculo del ocupante en caso de colisión frontal.
- El vehículo debe poder girar una curva en “U” en ambas direcciones en una pista de 16 m de ancho.
- El vehículo debe poder maniobrar siguiendo la disposición de obstáculos representados por conos en la figura 7.
- Para el funcionamiento del sistema de dirección se debe utilizar únicamente componentes mecánicos.

1.7.4.8 *Ruedas y neumáticos*

- El vehículo debe poseer dos ruedas delanteras y dos traseras, los puntos de contacto de los neumáticos con la superficie deben presentar simetría con respecto del centro longitudinal del vehículo.
- Es obligatorio disponer de suspensión en cada una de las ruedas.
- No se permite usar ruedas y neumáticos de bicicletas.
- Los neumáticos deben soportar las cargas o fuerzas de la masa del vehículo y del ocupante, su velocidad y frenado.
- Los neumáticos deberán tener una huella con una mínima profundidad de 1,5 mm. Se prohíbe el uso de neumáticos lisos.

- Los neumáticos de ruedas dispuestas en un mismo eje deben ser del mismo tipo.
- Los neumáticos no tienen que presentar defectos. (ONG La Ruta Solar, 2016)

1.7.4.9 Frenos

- El vehículo debe contar con un sistema de frenos hidráulicos principal equilibrado y con uno secundario, con circuitos de accionamiento independientes entre ambos sistemas, por seguridad. Estos sistemas pueden compartir pedales, manillas de accionamiento, cilindros hidráulicos, pistones, válvulas, entre otros.
- Los vehículos deben disponer de un freno de estacionamiento que pueda mantener estático al vehículo con su ocupante en una pendiente de 20%.
- Los sistemas de frenado no puede ser los de fabricación para bicicletas.
- El trabajo mecánico necesario para el frenado del vehículo tiene que ser aplicado por lo menos sobre dos de las ruedas, al menos en uno de los dos sistemas de frenado.
- Se debe contar con un tercer tipo de freno, eléctrico o hidráulico. Este no reemplazará a los sistema de frenado referidos anteriormente.
- El vehículo debe poder detenerse en 12,5 m desde una velocidad de 35 km/h y en 25 m si la velocidad es de 50 km/h. (ONG La Ruta Solar, 2016)

1.7.4.10 Fuentes de energía

- La irradiación solar recibida en las celdas fotovoltaicas es la única fuente de energía externa y no se permite rescatar la energía calórica generada.
- Para captar la irradiación solar, el vehículo puede disponer de una superficie máxima de 6 m² de celdas fotovoltaicas de silicio o 3 m² de galio arsénico.

- La combinación de distintos tipos de celdas fotovoltaicas será admisible únicamente bajo autorización de la Organización.
- El arreglo de celdas solares no debe afectar la estabilidad del vehículo.
- No se admite usar paneles fotovoltaicos adicionales de apoyo en caso de que el vehículo esté detenido o siendo remolcado.
- A través de un freno regenerativo se admite al uso de la energía recuperada por el propio movimiento del auto.

1.7.4.11 Almacenamiento y Carga de Energía

- El vehículo solar debe poseer un banco de baterías principal y uno auxiliar, con el propósito de almacenar la energía.
- El banco de baterías cumple la función de abastecer al sistema eléctrico de tracción del vehículo (electrónica de potencia y motor). El peso máximo que puede tener el banco de baterías depende del material, conforma se detalla en la tabla 2 :

Tabla 2. Tipo de baterías de almacenamiento para los vehículos evolución.

Material	Peso máximo
Ión-litio	20 kg
Litio polímero	20 kg
Fosfato de hierro y litio	40 kg
Níquel metal hidruro	70 kg
Plomo-Ácido	125 kg.

Fuente: Bases Técnicas CSA Evolución (2016)

- La masa del banco de baterías será verificada mediante Data Sheet de las baterías.
- El banco principal de baterías puede estar completamente cargado en el momento de la partida. En el transcurso de la carrera solamente puede ser cargado por las celdas fotovoltaicas o recuperada del movimiento del vehículo mediante el freno regenerativo.

- El banco principal se debe ubicar en un contenedor cerrado con una tapa, fijado rígidamente a la estructura y debe ser desmontable.
- El equipo está obligado a comenzar una etapa con el estado de carga que terminó la etapa anterior. Está permitido que siga cargando por medio de los paneles solares en tramos especiales.
- El banco de baterías auxiliar del auto abastece solamente al sistema eléctrico auxiliar (contactores, luces, sensores, sistemas de comunicación, telemetría,). Este banco tiene que garantizar la operación de sus componentes durante una etapa completa de competencia, dado que existen penalizaciones cuando los elementos antes mencionados no funcionan.
- Es necesario una ventilación para las baterías hacia el exterior. Sus terminales deben estar aisladas de sustancias inflamables. (ONG La Ruta Solar, 2016)

1.7.4.12 *Dispositivos y protecciones eléctricas*

- El vehículo solar debe contar con una cubierta protectora para impedir la manipulación directa de los dispositivos eléctricos o electrónicos por parte de cualquier ocupante o persona.
- Las cubiertas de dispositivos, cables o terminales donde el sistema eléctrico supere los 50 V, deben contar con la señal de advertencia (ISO 3864).
- El vehículo debe poseer un elemento de desconexión general simultáneo. El accionador debe estar señalizado conforme se indica en la figura 7:

Figura 7. Accionador de elemento de desconexión.



Fuente: Bases Técnicas CSA Evolución (2016)

1.7.4.13 *Luces e Indicadores*

- El auto solar debe poseer luces dispuestas simétricamente respecto del centro longitudinal, la intensidad de las luces debe posibilitar que sea apreciable con un vidrio ahumado, las luces de frenado serán distinguibles de las demás y se tendrá que disponer de una bocina de alerta. (ONG La Ruta Solar, 2016)

1.7.4.14 *Seguridad*

- En el volante deberán estar ubicados los accionadores de frenos, acelerador y otros mandos de la conducción. Además tienen que ser controlables por pedales. No deben existir elementos que puedan entrar en contacto con la humanidad del conductor para evitar posibles lastimaduras.
- El diseño del vehículo tiene que considerar la comodidad para el conductor tanto en reposo como mientras se halla en movimiento. Otro aspecto importante, a más del espacio, es la ventilación.

1.7.5 *Demanda energética*

Según MIDUVI y Cámara de la Construcción de Quito (2011) es la cantidad de energía que se requiere para una determinada aplicación.

$$D_e = t \cdot C_i \quad (1)$$

Dónde:

$$D_e = \text{Demanda energética} \left[\frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{m}^2 \cdot \text{día}} \right]$$

$$t = \text{tiempo estimado de uso por día} \left[\frac{\text{h}}{\text{día}} \right]$$

$$C_i = \text{Capacidad instalada} \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right]$$

En el caso de los autos solares, la demanda energética surge del requerimiento de suministro de radiación solar a los paneles fotovoltaicos, que se encargan de transformar

dicha energía en eléctrica, para posteriormente hacer funcionar al motor, el que acciona y permite el funcionamiento del vehículo.

La demanda energética originaria de la radiación solar es mayor que la energía que es aprovechada para el movimiento del vehículo solar, la razón para esto se debe a las considerables pérdidas debidas a las bajas eficiencias de trabajo, principalmente de los paneles fotovoltaicos.

1.7.6 *Capacidad de energía disponible en el sistema*

Según el MIDUVI y la Cámara de la Construcción de Quito (2011) la capacidad representa la cantidad de energía generada de forma estándar (1 000 W/m² y 25 °C), que corresponde a la eficiencia nominal de la celda multiplicada por el área a cubrir con paneles, conforme las siguientes fórmulas:

$$C_e = D_e \cdot A_i \cdot E_n \quad (2)$$

$$C_e = D_e \cdot A_p \cdot n_p \cdot E_n \quad (3)$$

Dónde:

C_e = capacidad de energía disponible $\left[\frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{día}} \right]$

D_e = Demanda energética $\left[\frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{m}^2 \cdot \text{día}} \right]$

A_i = área instalada [m²]

E_n = eficiencia nominal

A_p = área del panel [m²]

n_p = número de paneles

De acuerdo al MIDUVI y Cámara de la Construcción de Quito (2011) se afirma que para conocer la media mensual de radiación diaria sobre la superficie de un módulo fotovoltaico se debe emplear la ecuación siguiente:

$$\bar{H}_T = k \cdot \bar{H} \quad (4)$$

Dónde:

\bar{H}_T = media mensual de radiación diaria sobre la superficie del módulo fotovoltaico

k = factor que depende del sitio

\bar{H} = es la media mensual diaria de radiación sobre una superficie horizontal

Según el MIDUVI y Cámara de la Construcción de Quito (2011) a partir del cálculo anterior se puede determinar la cantidad de horas diarias de irradiación solar a 1 000 W/m², que es el número de horas de sol día, con la siguiente fórmula:

$$H_s = \frac{\bar{H}_T}{1000} \left[\frac{\frac{W \cdot h}{m^2 \cdot día}}{\frac{W}{m^2}} \right] \quad (5)$$

Dónde:

\bar{H}_T = media mensual de radiación diaria sobre la superficie del módulo fotovoltaico

H_s = es la media mensual diaria de radiación sobre una superficie horizontal.

1.7.7 *Parámetros físicos de influencia en la radiación solar*

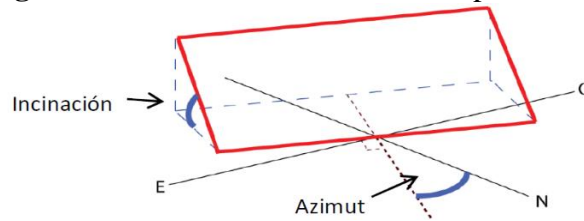
La energía que llega a la superficie terrestre depende de varios parámetros como la latitud, el cenit y el azimut.

1.7.7.1 *Latitud.* Es la distancia medida en forma angular entre la línea Equinoccial y un determinado punto del planeta, a lo largo del meridiano que pasa por ese punto. Esta magnitud se mide en grados (°), que oscilan entre 0 y 90 y se lo representa de dos formas: Indicando el hemisferio al que pertenece la coordenada, o añadiendo valores positivos para indicar el Norte y negativos para el Sur. La latitud a la que se encuentra una de las localidades que acogen la competición CSA, la ciudad de San Pedro de Atacama es de -22.9102°S o -22°54'36''S. (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2016)

1.7.7.2 *Azimut.* Es el ángulo de una dirección contado desde el norte geográfico. Este ángulo es importante cuando al trabajar con paneles solares inclinados.

A continuación se muestra un esquema del azimut y el ángulo de inclinación de un panel solar, en el que se muestran los puntos cardinales:

Figura 8. Azimut e inclinación en un panel solar.



Fuente: Explorador Solar de la Dirección Meteorológica de Chile (2017).

Sin embargo, por el hecho de que los vehículos solares se encuentran en constante movimiento, se trabaja sin inclinación o en posición horizontal. De igual manera, el azimut va a ir cambiando con la posición que ocupe el vehículo. Por lo cual para efectos de diseño no se considera estos parámetros.

1.7.8 *Matriz fotovoltaica*

Una matriz fotovoltaica está conformada por uno o varios módulos, que a su vez constan de algunas celdas solares, cada una de las cuales está formada por la unión tipo diodo n-p entre dos materiales con diferente conductividad eléctrica, preferentemente estos materiales son semiconductores. Uno de los dos materiales tiene exceso de electrones), se le denomina tipo “n” y presenta una capa de pequeño espesor; mientras que el otro material presenta déficit de electrones, se le denomina tipo “p” y se utiliza en una capa de mayor espesor. Esta configuración forma dentro del material un campo eléctrico interno que permite la acción del efecto fotovoltaico. (Moyano, et al., 2006 p. 15)

El efecto fotovoltaico se produce por la conversión de la luz del sol en energía eléctrica a través de materiales sólidos semiconductores, configurados como células fotovoltaicas. Los materiales semiconductores son aquellos que de acuerdo a la necesidad pueden actuar como conductores o no conductores. El efecto fotovoltaico fue descubierto por los científicos británicos William Grylls Adams y Richard Evens Day en los años 1870’s utilizando selenio (Se), pocos años más tarde Charles Fritt de New York construyó el primer módulo fotovoltaico de selenio para generación de energía eléctrica con base en este principio. Sin embargo, la eficiencia de la mencionada célula solar de selenio fue

menor al 0,5% lo que hizo que el costo de generación no fuera económico. (Chen, 2011 p. 177)

Posteriormente, se alcanzó una eficiencia del 5,7% para las celdas solares fotovoltaicas, mediante el uso del cristal de silicio (Si) y actualmente se llega hasta el 24%, valor muy cercano al máximo teórico del 28%. (Chen, 2011 p. 177)

Además de los materiales antes indicados, también hay celdas fotovoltaicas con otros materiales como diseleniuro de cobre en indio (CIS), telurio de cadmio (CdTe), arseniuro de galio (GaAs) y germanio (Ge). No obstante, el material predilecto es el silicio (Si).

Las celdas fotovoltaicas, según el material y la tecnología de fabricación, poseen un coeficiente de absorción de la radiación solar, así como una eficiencia de conversión, que es el porcentaje de la radiación incidente que se transformará en energía eléctrica. La mayor parte de los paneles solares trabajan a una eficiencia nominal de entre un 10% y 20%. (Dirección Meteorológica de Chile, 2017)

En el caso de los paneles solares de silicio, pueden ser de tres tipos:

1.7.8.1 Celda de silicio amorfo. Es una tecnología que emplea una lámina delgada, se produce mediante el depósito de silicio sobre un sustrato como plástico o cristal, siendo además necesario crear un ambiente con un gas reactivo como el silano (SiH_4). Su rendimiento o eficiencia es menor al 10%. En el laboratorio bordea el 16%.

1.7.8.2 Celda de silicio monocristalino. Su componente básico es el silicio crecido en lingote de una sola estructura cristalina. La eficiencia oscila entre el 15 y 18%. En el laboratorio se alcanza hasta el 24%.

1.7.8.3 Celda de silicio policristalino. Su componente básico de fabricación es el silicio crecido con varias estructuras cristalinas (MIDUVI y Cámara de la Construcción de Quito, 2011). La eficiencia característica oscila entre 12 y 14%, en laboratorio ésta puede llegar al 19 o 20%.

Hay varios paneles fotovoltaicos en el mercado que se diferencian, por su eficiencia en transformar la radiación solar en electricidad.

Adicionalmente, otros parámetros que repercuten en la selección de los paneles fotovoltaicos son las dimensiones, es decir el largo y ancho útil para la captación de la radiación solar. Así como el material de los mismos y su estructura celular. Por lo común, las celdas son de silicio, con un marco de aluminio y un cristal en la parte frontal. Un módulo fotovoltaico igual o mayor a 140 Wp (Potencia pico del módulo fotovoltaico) de potencia debe tener un voltaje nominal de 24 V.

Según MIDUVI y Cámara de la Construcción de Quito (2011) se menciona que la cantidad de celdas fotovoltaicas a utilizarse para la captación de la energía requerida, se establece en función del área total disponible y del área de las celdas a ser instaladas, como se muestra en la siguiente fórmula:

$$\# \text{ celdas} = \frac{A_d}{A_c} \quad (6)$$

Dónde:

A_c = área geométrica de cada una de las celdas [m²].

A_d = área geométrica disponible para las celdas [m²].

1.7.9 *Almacenamiento de la energía*

El almacenamiento de la energía captada por las celdas fotovoltaicas, se realiza mediante el uso de baterías, también conocidos como acumuladores, las cuales al tratarse de sistemas fotovoltaicos tienen que suministrar una corriente muy cercana a su máximo nominal, por varias horas y sin el requerimiento de ser recargadas.

El régimen de carga de una batería solar está asociado a los parámetros eléctricos como la capacidad de la batería en Amperios Hora (A·h) y la profundidad de descarga (PdD). Por otra parte, la calidad de una batería solar está en función de la capacidad de acumulación Amperios Hora Voltios (A · h · V) y entrega (PdD) de energía durante prolongados periodos de actividad.

Las baterías para las aplicaciones solares tienen que estar fabricadas de acuerdo con lo estipulado por la norma IEC 61427 (Secondary cells for solar photovoltaic energy systems. General requirements and test methods) u otra norma internacional aceptada.

Las baterías para uso solar deben tener un régimen de auto descarga que no exceda el 5% por mes. Además es necesario que los bancos de baterías se encuentren en lugares ventilados pero a la vez protegidos del ambiente. (MIDUVI y Cámara de la Construcción de Quito, 2011)

Por otra parte, la máxima profundidad de descarga referida a la capacidad nominal de la batería en 20-horas no debe superar los valores presentados en la tabla 3:

Tabla 3. Máxima profundidad de descarga en función del tipo de batería.

Tipo de Batería	Máximo PdD (%) Recomendado	Número de ciclos NOC a 50% PdD
Tubular o estacionaria abierta	80	3 600
Estacionaria sellada	60	600-1 200
Plomo acido solar abierta	50	900-1 000
Plomo acido sellada AGM	60	500-800
Plomo acido sellada GEL	60	600-950
Ion Litio	100	Más de 1 000
Sodio Azufre (NaS)	80	Más de 4 000

Fuente: MIDUVI y Cámara de la Construcción de Quito, 2011.

Es necesario asegurarse que la capacidad inicial de las baterías en funcionamiento no difiera en más del 5 % de su valor nominal. De igual manera, la vida de la batería (antes de que su capacidad residual decrezca bajo el 80 % de su capacidad nominal) a 20°C, debe exceder el máximo número de ciclos (NOC) de carga y descarga. A una PdD del 50%, conforme lo mostrado en la tabla anterior. De entre las baterías más comúnmente utilizadas están las de ión-litio y las de plomo-ácido. (MIDUVI y Cámara de la Construcción de Quito, 2011)

1.7.9.1 Baterías de Ión-Litio. Poseen como electrolito una sal de litio, entre sus características destacan el hecho de ser livianas, tienen más potencial electroquímico y es el mejor contenedor de energía de los metales. Estas baterías emplean el litio metálico como electrodo negativo para proveer alto voltaje, y buena capacidad de almacenamiento. (MIDUVI y Cámara de la Construcción de Quito, 2011)

1.7.9.2 Batería de plomo-acido. Estas baterías pueden ser construidas con placas de plomo puro, plomo-antimonio o plomo calcio y un electrolito ácido.

Según MIDUVI y Cámara de la Construcción de Quito (2011) la capacidad de las baterías se determina mediante aplicación de la siguiente fórmula:

$$C_{bat} = \frac{D_e \cdot d_a}{PdD \cdot V_s} \quad (7)$$

Dónde:

C_{bat} = capacidad de las baterías [A·h]

D_e = Demanda energética $\left[\frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{m}^2 \cdot \text{día}} \right]$

d_a = Días de autonomía.

PdD = Profundidad de descarga de una batería [%]

V_s = voltaje del sistema [V]

1.7.10 *Inversión de la energía*

Un inversor es un elemento eléctrico que tiene la función de transformar la corriente continua de baja tensión (12, 24, 32, 36 o 48 V) generada por las placas fotovoltaicas y acumulada en las baterías, a corriente alterna de 110 V o 220 V y con una frecuencia de 50 o 60 Hz. De esta manera se la puede utilizar en varios equipos eléctricos y en el presente caso en el auto solar. (SIMEC CHILE SRL, 2009)

En las principales especificaciones de un inversor para uso solar están las siguientes:

El inversor debe ser fabricado en conformidad con la norma UL 1741 u otras normas aplicables. La potencia nominal debe ser igual a la carga instalada más al menos un 25% y la sobrecarga instantánea de por lo menos un 50% de la potencia nominal del inversor. Debe operar en el mismo rango de funcionamiento de voltaje que el banco de baterías. La regulación del voltaje de salida debe estar por el $\pm 5\%$. El consumo interno en vacío no debe exceder el 2% de la potencia nominal. (MIDUVI y Cámara de la Construcción de Quito, 2011)

Los inversores deben trabajar con una onda senoidal pura y el rendimiento con cargas resistivas tiene que ser más elevado que los límites especificados en la siguiente tabla:

Tabla 4. Rendimiento de inversores según el tipo.

Tipo de inversor		Rendimiento al 20% de la potencia nominal	Rendimiento a potencia nominal
Onda senoidal	$P_{NOM} \leq 500 \text{ VA}$	> 80%	> 70%
	$P_{NOM} > 500 \text{ VA}$	> 85%	> 80%
Onda no senoidal		> 85%	> 80%

Fuente: MIDUVI y Cámara de la Construcción de Quito, 2011.

Donde:

P_{NOM} = potencia nominal [VA]

1.7.11 Sistema de potencia

Una vez que la energía es obtenida de la radiación solar, almacenada en las baterías y transformada en el tipo de corriente alterna mediante el inversor, un auto solar ya puede utilizarla para la generación de su movimiento mediante la conversión de la energía eléctrica en mecánica. Para ello se requiere de ciertos componentes que son parte del vehículo, como es el caso del motor y el mecanismo de transmisión de potencia. (Gonzalez-Logatt, 2008)

1.7.11.1 Motor. Es un dispositivo que transforma un determinado tipo de energía en energía mecánica, en el caso de los motores eléctricos la energía mecánica para el desplazamiento del vehículo es proveniente de la energía eléctrica. (Moyano, et al., 2006)

Para uso en autos solares mediante paneles fotovoltaicos se recomienda usar un motor eléctrico de corriente continua, de 12 VDC a 12 000 rpm, en cuyo caso se debe complementar con una caja de reducción de velocidad. (Instituto Tecnológico de Canarias, 2008)

O a su vez utilizar un motor eléctrico de corriente alterna a 220 VAC y a velocidades notoriamente menores respecto de las de los motores de corriente continua. Los motores de corriente alterna pueden ser asíncronos (de inducción) o síncronos de rotor bobinado o de imanes permanentes. (Carreño, Vacca, et al. Lugo, 2012)

1.7.11.2 Mecanismo de transmisión. Cuando se efectúa un trabajo, no es igual ejecutarlo en un corto período de tiempo que en otro mayor. Esta situación lleva a la

necesidad de definir otra magnitud física que relaciona no sólo el trabajo, sino también el tiempo en que el mismo se realiza. (Moyano, et al., 2006 p. 36)

Se define la potencia como el producto entre la fuerza aplicada a un cuerpo y la velocidad que éste adquiere (p. 36).

$$P = F \cdot v \quad (8)$$

$$P = T \cdot \omega \quad (9)$$

$$I = T \cdot F \quad (10)$$

Dónde:

P = Potencia [Watt o en hp]. $1\text{hp} = 745.7\text{ W}$

F = Fuerza motriz [Newton]

v = Velocidad [m/s]

ω = Velocidad angular de la rueda

T = Momento de la fuerza, torque o par de tracción de la rueda

I = Momento de inercia [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]

m = masa total del vehículo [kg]

R = radio de la rueda [m]

a = aceleración [m/s^2]

1.7.11.3 Funcionamiento del vehículo. En la conducción de los vehículos existen varios aspectos que obligan al motor a dar una respuesta diferente en cada momento. El par a ser transmitido a las ruedas tiene que poder vencer las resistencias opuestas al desplazamiento (par de rodadura), al mismo tiempo que proporcionar una aceleración satisfactoria (par de aceleración) y también debe ser capaz de superar los obstáculos y las pendientes. (Carreño, Vacca y Lugo, 2012)

Por consiguiente, el par en el eje de la rueda se determina mediante la siguiente fórmula:

$$T_e = T_R + T_a + T_{sp} + T_{so} \quad (11)$$

Dónde:

T_e = Par en el eje de la rueda [N.m]

T_R = Par de rodadura [N.m]

T_a = Par de aceleración [N.m]

T_{sp} = Par superación de pendientes [N.m]

T_{so} = Par de superación de obstáculos [Nm]

Par de Rodadura T_{rod}

Es el torque requerido para mantener el movimiento del vehículo y que tiene por objeto vencer tanto la resistencia por contacto entre las ruedas y el piso (par de fricción), además de vencer la resistencia del flujo de aire en los alrededores del vehículo (par aerodinámico). Por consiguiente el par de rodadura se puede expresar de la siguiente manera:

$$T_R = T_f + T_A \quad (12)$$

Dónde:

T_R = Par de rodadura [N.m]

T_f = Par de fricción [N.m]

T_A = Par aerodinámico [N.m]

Cuando las velocidades del vehículo son bajas, predomina la resistencia a la rodadura, que está en función del peso del vehículo y de las condiciones del pavimento. De esta manera, en asfalto rugoso se tiene una mayor resistencia a la rodadura a diferencia de lo que ocurre con el asfalto liso. Además influye el tipo de llanta seleccionada, siendo las gruesas y de baja presión las que presentan menor resistencia.

Para estimar la resistencia a la rodadura no se dispone de un método estándar, la fórmula (12) es general y el cálculo de la fricción y del par aerodinámico es complicado de determinar. Por esta razón, se suelen utilizar fórmulas empíricas, como la que sugiere la General Motors para vehículos solares, la que se muestra a continuación:

$$\text{Par de rodadura} = C_{rr} \left(1 + \frac{v}{161} \right) W \quad (13)$$

Dónde:

C_{rr} = coeficiente adimensional de resistencia a la rodadura

v = velocidad del vehículo solar [km/h]

W = peso del vehículo [N]

La fórmula (13) obedece a una aproximación empírica, establecida con base en pruebas realizadas por el fabricante de vehículos solares General Motors.

Par de aceleración T_{acel}

Es el par necesario para alcanzar la velocidad requerida, el conseguir este par implica por una parte, superar la inercia de las masas rodantes, y por otra, contar con un par capaz de acelerar el peso del vehículo. (Carreño, Vacca y Lugo, 2012)

El par de aceleración es igual al par inercial de las ruedas más el par acelerador masa del vehículo, conforme la siguiente fórmula:

$$T_{\text{acel}} = \left(\frac{I}{R} + m \cdot R \right) \cdot a \quad (14)$$

Dónde:

R = radio de la rueda [m]

a = aceleración [m/s^2]

m = masa total del vehículo [kg]

Par superación de pendientes T_p

Carreño, Vacca y Lugo (2012) manifiestan que cuando el vehículo se encuentra sobre una pendiente, se genera una componente del peso en la misma dirección del avance por lo que el par requerido será igual a:

$$T_p = m \cdot g \cdot \text{sen}\beta \cdot R \quad (15)$$

Dónde:

R = radio de la rueda [m]

g = aceleración de la gravedad [9.8 m/s^2]

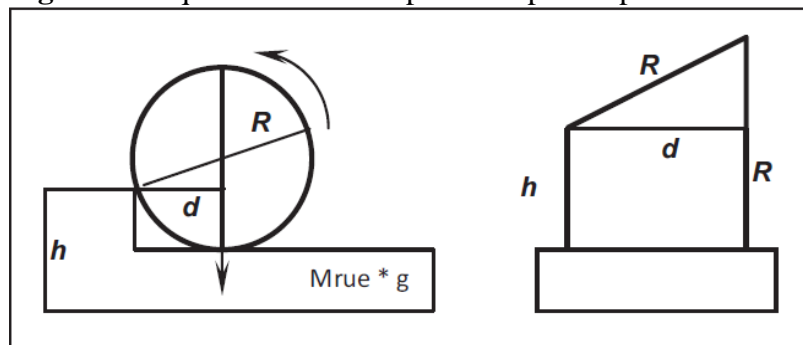
m = masa total del vehículo [kg]

$\text{Sen } \beta$ = seno del ángulo β , que marca la inclinación de la pendiente del terreno

Par de superación de obstáculos T_{obs}

Cuando el vehículo debe superar un obstáculo, como la necesidad de subir un andén, se precisa un aporte extra de un par, debido a la distancia “ d ” existente entre el punto de apoyo en el andén y el punto de aplicación de la fuerza de reacción del peso sobre el suelo, o sea, la componente normal ($N = M_{\text{rue}} \times g$). (Carreño, Vacca, et al. Lugo, 2012)

Figura 9. Esquema de los componentes para superar un andén.



Fuente: Carreño, Vacca y Lugo, (2012).

$$T_{\text{obs}} = M_{\text{rue}} \cdot g \cdot \sqrt{2 R h - h^2} \quad (16)$$

Dónde:

M_{rue} = masa sobre una rueda [kg]

R = radio de la rueda [m]

g = aceleración de la gravedad [9.8 m/s^2]

h = altura del obstáculo [m]

1.7.12 *Pruebas de inspección técnica*

Las pruebas de inspección técnica al vehículo constan de pruebas estáticas y dinámicas, como se menciona a continuación:

Pruebas estáticas:

- Revisión mecánica.
- Revisión eléctrica.
- Pesaje de ocupantes y del vehículo.
- Evacuación de los ocupantes del vehículo.
- Funcionamiento del freno de estacionamiento.
- Valorización de los componentes principales, motor-controlador-baterías-celdas (sólo para la categoría Híbrido).

Pruebas dinámicas:

- Viraje en U.
- Reversa (sólo para la categoría Evolución).
- Frenado corto.
- Frenado largo (sólo para la categoría Evolución).
- Salida de inercia en pendiente.
- Maniobrabilidad.
- Revisión de la velocidad mínima, 50km/h para la Evolución.

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA

2.1 Diseño metodológico

El tipo de estudio corresponde a un proyecto de investigación, como un trabajo orientado a la discusión de conocimientos científicos para sustentar una propuesta de solución a un problema relacionado con las áreas de formación de la carrera, en este caso para la formulación de un diseño de un sistema de potencia de un prototipo de vehículo mediante el uso de energía solar para la competencia. A partir de esto se pretende encontrar resultados que den respuesta al mencionado problema. Por consiguiente se corresponde con una investigación exploratoria y descriptiva.

Tabla 5. Diseño metodológico

Modalidad de Investigación	Técnicas de Investigación	Instrumentos de Investigación
Investigación bibliográfica documental	Resumen y síntesis	Documentos y registros
Investigación de campo	Observación	Fichas de observación
	Observación asistida técnicamente	Instrumentos de medición

Fuente: Autor

2.1.1 Especificaciones de diseño

Tabla 6. Especificaciones de diseño vehículo evolución para la CSA.

Especificaciones de Diseño	
Largo	máx.4,5 m
Ancho	máx.1,8 m
Altura	máx 1,8 m
Distancia entre los centros de los neumáticos de las ruedas de un mismo eje	Mayor a la mitad del ancho del vehículo
Chasis	Con barras estructurales antivuelco en chasis
Asientos	-Dispone de un espaldar que permite al ocupante apoyar toda la espalda y que no lo sobrepase en altura en posición de conducción. -El asiento del vehículo dispone de un apoya cabeza a no menos de 80 cm desde el punto de referencia del asiento.

Especificaciones de Diseño	
Puertas y aperturas	<ul style="list-style-type: none"> -El vehículo permite al ocupante entrar y salir de él sin ser asistido en no más de 10 segundos. -Las puertas se abren y se cierran desde dentro y fuera del vehículo.
Ventanas y parabrisas	<ul style="list-style-type: none"> -Ventanas fabricadas con materiales resistentes a roturas y daños mayores. -Transparentes, para ver fácilmente al ocupante desde fuera del vehículo.
Visión	-El ocupante posee una visión delantera y periférica clara.
Funcionamiento	<ul style="list-style-type: none"> -El vehículo solar debe ser impulsado de forma autónoma con en el momento de la conducción. -El vehículo debe poder arrancar desde el reposo en una pendiente de 14% sin ser empujado.
Funcionamiento en clasificatorias (evento previo a los días de competencia, en el que los vehículos se someten a pruebas técnicas, a fin de comprobar que cumplan con los requerimientos técnicos y de seguridad)	El vehículo está en capacidad de completar, sin presentar fallas eléctricas ni mecánicas, el circuito del autódromo de Alto Hospicio, que mide 1,8 km, a una velocidad promedio mínima de 50 km/h.
Dirección	<ul style="list-style-type: none"> -Volante de perímetro continuo. -La columna de dirección del vehículo es colapsable, de manera de evitar la intrusión de ésta en el habitáculo del ocupante en caso de colisión frontal. -El vehículo debe girar en “U” en ambas direcciones en una pista de 16 m de ancho. -El vehículo es capaz de maniobrar a través de una disposición de obstáculos representadas por conos. -El sistema de dirección del vehículo considera sólo componentes mecánicos.
Ruedas y neumáticos	<ul style="list-style-type: none"> -El vehículo posee dos ruedas delanteras y dos traseras, dispuestas de manera tal que los puntos de contacto de los neumáticos con la superficie son simétricos respecto del centro longitudinal del vehículo. - Se cuenta con suspensión en todas las ruedas.
Frenos	<ul style="list-style-type: none"> -El vehículo cuenta con dos sistemas de frenos hidráulicos equilibrados. -El vehículo debe contar con un freno de estacionamiento capaz de mantenerlo estático con su ocupante en una pendiente de 20%. -El vehículo está obligado a detenerse en 12,5 m desde una velocidad inicial de 35 km/h y en 25 m desde 50 km/h.

Especificaciones de Diseño	
Fuentes de energía	-Irradiación solar directa y difusa receptada por las celdas fotovoltaicas. -Área de captación de los paneles 6 m ²
Almacenamiento y Carga de Energía	-El sistema de almacenamiento de energía estará conformado por un banco de baterías principal y otro auxiliar. -La capacidad del banco de baterías está restringido por masa dependiendo del tipo de baterías que se utilice: <ul style="list-style-type: none"> • Ión litio 20 kg • Litio polímero 20 kg • Fosfato de hierro y litio 40 kg • Níquel metal hidruro 70 kg • Plomo Ácido 125 kg.
Peso máximo total del vehículo	200 kg.
Longitud total del recorrido	2 300 km
Irradiación media Atacama	275 W/m ²
Velocidad mínima	30 km/h (8,33 m/s)
Velocidad media	50 km/h (13,88 m/s)
Velocidad máxima	120 km/h (33,33 m/s)

Fuente: Bases Técnicas CSA Evolución (2016)

Nota. Si el vehículo solar cuenta con al menos una estructura móvil, las ruedas no deben exceder las máximas dimensiones establecidas.

2.2 Matriz de involucrados

En el presente estudio intervienen los siguientes participantes:

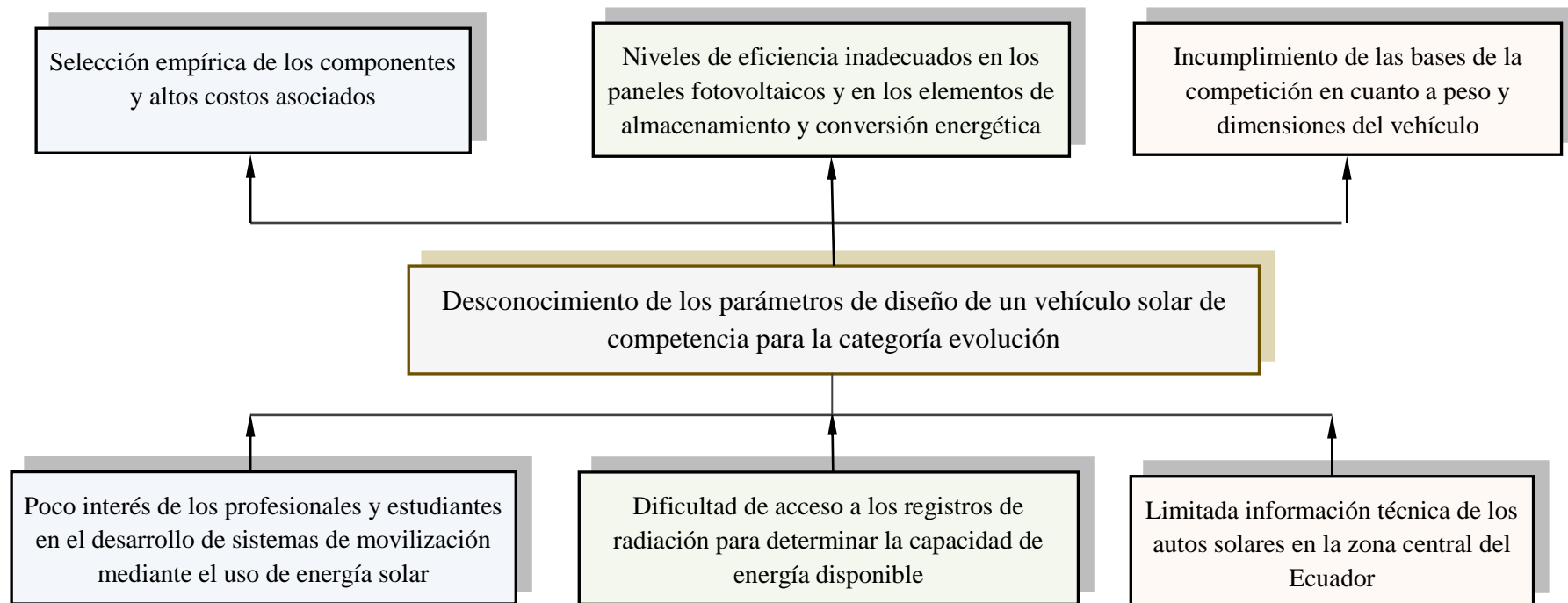
Tabla 7. Involucrados en el proyecto.

Participante	Responsabilidad
Autor	Investigación y redacción
Tutor	Dirección del proyecto
Asesor	Guía en la parte metodológica
Beneficiarios	Estudiantes de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH

Fuente: Autor

2.3 Árbol de problemas

Figura 10. Árbol de problemas de la investigación.



Fuente: Autor

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS

3.1 Datos de radiación solar

Se consideran los datos de irradiación solar proporcionados por la Dirección Meteorológica de Chile para la región que comprende el Desierto de Atacama.

Con el objeto de conocer las características topográficas del lugar de la competencia y determinar los datos de radiación incidente, para posteriormente analizar la energía disponible y definir los parámetros de diseño de la matriz fotovoltaica, los dispositivos de almacenamiento y la conversión de energía; se utilizó la herramienta en línea denominada “Explorador Solar”, desarrollada por el Ministerio de Energía conjuntamente con la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, que dispone de una base de datos de radiación solar.

La metodología empleada para calcular la radiación en el Explorador Solar incluye un modelo de transferencia radiativa (CLIRAD-SW) para calcular en cielo despejado la radiación solar global con la directa y difusa que son sus componentes.

Para el cálculo de los datos se tiene en cuenta el efecto de la masa de la columna atmosférica y la interacción de la radiación con el anhídrido carbónico, vapor de agua, aerosoles y ozono.

Al tener como referente la ciudad de San Pedro de Atacama, se tienen las siguientes características del sitio:

Tabla 8. Características topográficas del sitio escogido.

Nombre del sitio:	San Pedro de Atacama
Latitud:	22.9102°S
Longitud:	68.201°O
Elevación:	2 443 metros

Fuente: Ministerio de Energía del Gobierno de Chile (2016).

Figura 11. Mapa del sitio seleccionado



Fuente: Ministerio de Energía del Gobierno de Chile (2016).

En el Explorador Solar de la Dirección Meteorológica de Chile se puede obtener la disponibilidad energética, según el sitio y las condiciones de diseño del sistema de captación. Para su uso se selecciona el lugar en el cual se empleará el sistema fotovoltaico, en este caso se consideró San Pedro de Atacama, luego se personaliza el panel solar fotovoltaico, para lo cual se consideraron ciertos parámetros preliminares tales como:

- La capacidad instalada del panel, para cuyo efecto se revisó la información presentada en estudios existentes al respecto, con el fin de conocer estimar un valor que sea satisfactorio. En este sentido, de acuerdo a autores de proyectos y fabricantes de vehículos solares para competición en la categoría evolución, se trabaja con potencias que oscilan los 3 kW. (A. Nader, Ghoneim y S. Alsayed 2015; Equipo Solar Corp. 2015)

Otros datos a ingresar en la configuración del sistema fotovoltaico son:

- El tipo de arreglo del panel, que es en posición fija horizontal (con azimuth e inclinación de 0°), debido a que la variación no es relevante por el movimiento permanente del vehículo se considera que el panel está perpendicular al radio de la Tierra.
- En cuanto a las características del panel fotovoltaico, se consideró un coeficiente de sensibilidad a la temperatura de -0,45 (valor por defecto que considera el Explorador Solar para el lugar de la competición). Un factor de pérdidas del 14% (valor estándar), que se debe a aspectos diversos como, acumulación de suciedad en el panel, sombras que se producen en el entorno, imperfecciones del panel,

conexiones y cableado y tiempo de apagado por mantención. La eficiencia del inversor del 96% (valor estándar que constituye un promedio obtenido a partir de varios inversores) y un panel con cubierta de vidrio.

- Finalmente, para la estimación del tamaño del sistema fotovoltaico, se consideró un área total disponible para las celdas de 5 m² (la máxima puede ser de 8,1 m² para todo el vehículo), con un factor utilizable del 60%. Por otra parte, un factor de pérdidas en el panel del 15% (que representa una media), debido a que los valores de eficiencia característica de las celdas de silico monocristalinas (15-18%) y policristalinas (12-14%). (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2016)

Es importante mencionar que el propósito de la aproximación es obtener la radiación disponible en el lugar de la carrera y en concordancia con los parámetros de diseño del sistema fotovoltaico para el vehículo solar. A continuación se presenta imagen con los datos ingresados para el cálculo:

Figura 12. Configuración del sistema fotovoltaico.

CONFIGURAR SISTEMA FOTOVOLTAICO

Fotovoltaico

Capacidad Instalada: 3.0 kW Estimar tamaño

Características de la Estructura

Tipo de Arreglo: Fijo - Horizontal Máxima inclinación HSAT: 45°

Tipo de Montaje: ESTRUCTURA AISLADA Optimizar ángulos de instalación

Inclinación: 0°

Azimut: 0°

Características del Panel Fotovoltaico

Coeficiente de Temperatura: -0.45 Cobertura: Vidrio

Factor de Pérdidas: 14% Eficiencia del Inversor: 96%

CALCULAR

Estimar tamaño del sistema fotovoltaico

Utiliza la herramienta para dibujar un polígono en el mapa y definir el área disponible para la instalación PV. Una vez definido el polígono y las características del sistema presionar el botón **CALCULAR** para estimar la generación.

Área total disponible: 5 m²

Fracción Utilizable: 60%

Eficiencia módulos PV: 15%

Fuente: Ministerio de Energía del Gobierno de Chile (2016).

Una vez ingresados los datos se calculan los valores de la radiación que incide en plano horizontal, debido a que en el diseño se considera que no existe inclinación para los paneles fotovoltaicos. Las siguientes tablas y gráficos muestran los promedios de la radiación global, de radiación directa y de radiación difusa incidente sobre un panel orientado horizontalmente para el período 2004-2016, según la configuración descrita en la imagen anterior y clasificada por los meses del año:

Tabla 9. Radiación incidente en plano horizontal

	Promedio Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Directa (kWh/m ² /día)	6,56	7,71	7,21	6,95	5,91	4,92	4,35	4,59	5,44	6,62	7,77	8,47	8,36
Difusa (kWh/m ² /día)	0,56	0,82	0,8	0,6	0,51	0,42	0,42	0,43	0,49	0,54	0,58	0,61	0,71
Global (kWh/m ² /día)	7,12	8,54	8,01	7,55	6,42	5,34	4,77	5,02	5,93	7,15	8,35	9,08	9,07

Fuente: Ministerio de Energía del Gobierno de Chile (2016).

Nota: En caso de que la superficie receptora de la radiación se encuentre en posición horizontal, es decir, perpendicular al radio de la tierra, se le llama radiación horizontal.

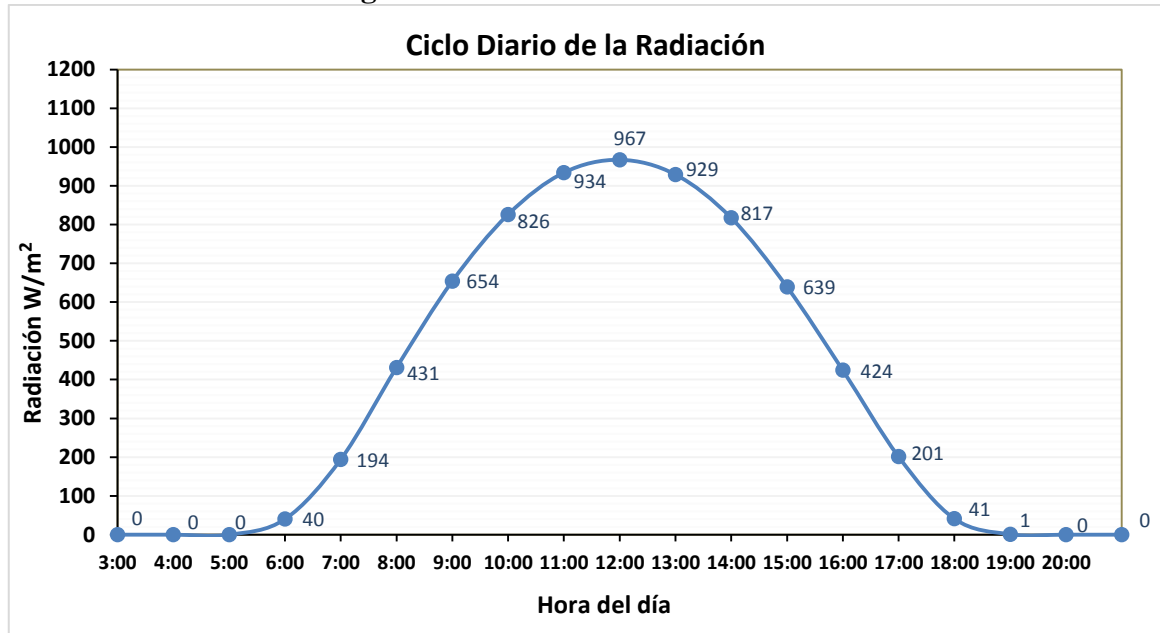
De la tabla 9 se considera el valor de radiación global de 9,07 kW·h/m²/día, que corresponde a la magnitud del área bajo la curva, como el parámetro de diseño, debido a que la competición se realiza en diciembre.

Es importante mencionar que el valor indicado ya corresponde a la energía disponible media en un día, considerando el número de horas solares. El programa ya lo establece directamente, por lo tanto no hace falta determinar el número de horas solares.

El valor medio de radiación global de 9,07 kW·h/m²/día, corrobora la afirmación de que es la más alta del planeta y que permite considerar una irradiancia de 1000 W/m². Como referencia se puede dar a conocer que de acuerdo a un estudio realizado por Myers, Emery y Gueymard (2004) en los lugares de mayor radiación de USA, se determinó que la media es de 6.61 kW·h/m²/día, en cuyo caso se estimó como la irradiancia acumulada de 900 W/m².

También es importante conocer la distribución de la radiación global incidente media en el período 2004-2016 según la hora del día, la cual se muestra en la siguiente gráfica:

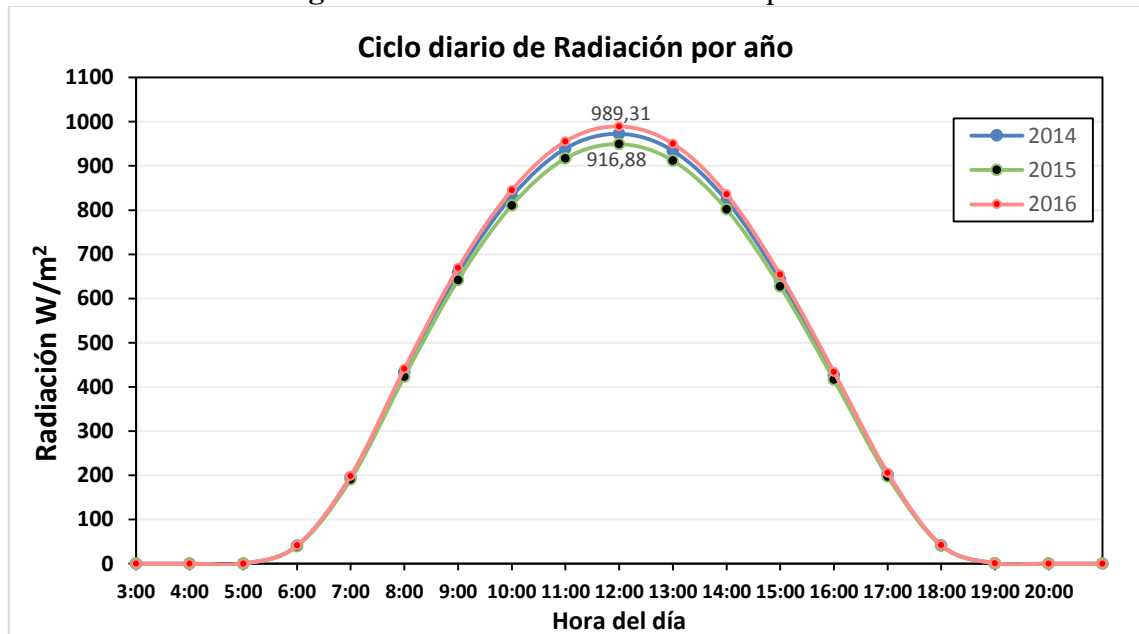
Figura 13. Ciclo diarios de radiación.



Fuente: Ministerio de Energía del Gobierno de Chile (2016).

Es de interés establecer los niveles de radiación de los últimos años, con el propósito de que los datos disponibles se ajusten a la realidad y se puedan proyectar para los diseños de vehículos solares que se realicen posteriormente. Por este motivo, se muestran las gráficas de radiación global de los años 2014, 2015 y 2016 según la hora del día en la figura 14:

Figura 14. Ciclo diarios de radiación por año.



Fuente: Ministerio de Energía del Gobierno de Chile (2016).

Al constatar las curvas obtenidas para los tres últimos años se evidencia que la variación no excede el 8%, ya que al tomar como referente el promedio de los valores máximos, se observa que en el año 2016 se obtuvo un pico de 989,31 W/m² a las 12h00 del medio día, mientras que el valor fue de 916,88 W/m² a la misma hora del año 2015 y fue de 972,58 W/m² en el año 2014. Es decir, el mínimo (2015) representa el 92,68% del máximo (2016). Con el fin de tomar un valor referente se podría considerar los datos del año 2014, con lo cual el margen de error no superaría el 5%.

3.2 Parámetros de diseño

Los parámetros recomendados para el diseño del vehículo evolución se establecen con sustento en las bases de la competición y mediante aplicación de las fórmulas correspondientes. A continuación se presentan los parámetros a ser considerados en el diseño, en los cuales se muestran valores máximos y mínimos, con el propósito de que se escoja la alternativa más idónea según la necesidad:

3.2.1 *Demanda energética*

La demanda energética se establece con base en el área de los paneles, la irradiancia de diseño de 1 000 W/m², la eficiencia de la matriz fotovoltaica que depende del material y el tiempo de utilización diaria del sistema (en este caso el vehículo solar, que se estima de 6 horas diarias). Los valores calculados de la demanda energética se presentan en la tabla 12.

3.2.2 *Capacidad de energía disponible en el sistema*

Considerando el valor de la radiación global de 9,07 kW·h /m²/día (tabla 9), que el área útil máxima para la matriz fotovoltaica es de 6 m² y los márgenes de eficiencias típicas de los paneles fotovoltaicos, en este caso la capacidad de energía disponible o energía matriz es la siguiente:

$$C_e = D_e \cdot A_i \cdot E_n \quad (2)$$

Tabla 10. Capacidad de energía disponible según la matriz FV.

Especificaciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Demanda energética	$9,07 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{m}^2 \cdot \text{día}}$			
Área instalada para celdas fotovoltaicas	2,5 m ²	4 m ²	5 m ²	6 m ²
Eficiencia nominal de las celdas	12 - 20%	12 - 20%	12 - 20%	12 - 20%
Capacidad de energía disponible	Mín. $2,72 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{día}}$ Máx. $4,54 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{día}}$	Mín. $4,35 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{día}}$ Máx. $7,26 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{día}}$	Mín. $5,44 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{día}}$ Máx. $9,07 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{día}}$	Mín. $6,53 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{día}}$ Máx. $10,9 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{día}}$

Elaborado: Autor.

Para efectos de diseño se estima que la irradiancia debe ser de 1 000 W/m², debido a que con ese valor se establece el número de horas de sol día. (MIDUVI y Cámara de la Construcción de Quito, 2011)

Al aplicar las fórmulas correspondientes se tiene:

$$\bar{H}_T = k \cdot \bar{H} \quad (4)$$

El Valor de k es de 0.85, dado a que el panel se coloca en posición horizontal y la latitud de la región de Atacama. Por lo tanto el número de horas de sol día es el siguiente:

$$\bar{H}_T = 0.85 \bar{H}$$

$$H_S = \frac{0,85 \cdot \bar{H}}{1000} \left[\frac{\frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{m}^2 \text{día}}}{\frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \right]$$

$$H_S = \frac{0,85 \left(9\,070 \frac{\text{W} \cdot \text{h}}{\text{m}^2 \text{día}} \right)}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

$$H_S = 7,71 \frac{\text{h}}{\text{día}}$$

Tomando como referente la radiación de 1 000 W/m², se tiene 7,71 horas de sol día.

3.2.3 Selección de Paneles fotovoltaicos

La potencia requerida para la matriz fotovoltaica se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$P = G \cdot A \cdot E_n$$

Tabla 11. Potencia requerida para la matriz FV.

Especificaciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Irradiancia para diseño G	1 000 W/m ²	1 000 W/m ²	1 000 W/m ²	1 000 W/m ²
Área instalada para celdas fotovoltaicas A	2,5 m ²	4 m ²	5 m ²	6 m ²
Eficiencia nominal de las celdas	12 - 20%	12 - 20%	12 - 20%	12 - 20%
Potencia requerida de la matriz fotovoltaica	Mín. 300 W Máx. 500 W	Mín. 480 W Máx. 800 W	Mín. 600 W. Máx. 1 000 W.	Mín. 720 W. Máx. 1 200 W

Elaborado: Autor.

Al observar la tablas 10 y 11, de las cuatro alternativas planteadas, se debe considerar que la última de las mismas no es conveniente, debido a que las grandes dimensiones del panel podrían ocasionar que se exceda el peso máximo del vehículo establecido por la reglamentación (200 kg) y además incrementaría los costos de adquisición y de instalación de los componentes.

Las celdas fotovoltaicas disponibles en el mercado son de silicio monocristalino, policristalino y en menor grado silicio amorfo. Los paneles fotovoltaicos de celdas monocristalinas tienen las mayores eficiencias (entre 15 y 21%), debido a que el silicio es de alta pureza, además la vida útil de este tipo de paneles es más larga en comparación a los otros.

En el caso de los paneles con celdas policristalinas, son más económicos, porque su proceso de fabricación es menos complejo dado que el aprovechamiento del silicio es mayor. Los paneles con celdas de silicio amorfo son muy ligeros, también poseen una elevada eficiencia (oscila el 18%), pero no se encuentran disponibles fácilmente, además de que son de un costo más elevado que los otros tipos.

Tomando en consideración los parámetros de diseño establecidos previamente, así como la disponibilidad de celdas fotovoltaicas en el mercado y las características que debe tener los vehículos solares evolución, se han establecido las siguientes alternativas:

Tabla 12. Alternativas de paneles fotovoltaicos utilizables para el auto solar evolución.

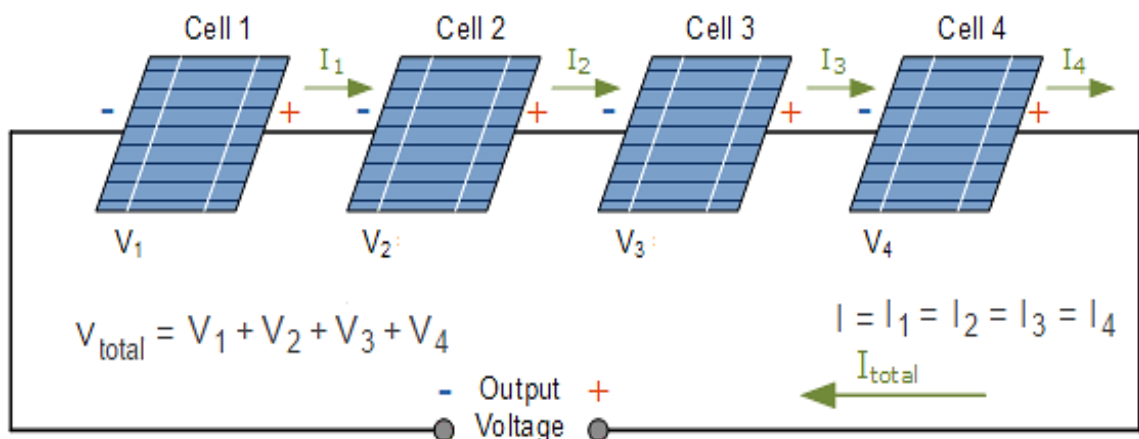
Especificaciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Área geométrica disponible para la celda	2,5 m ²	4 m ²	5 m ²
Tecnología	Silicio policristalino Silicio monocristalino	Silicio policristalino Silicio monocristalino	Silicio policristalino Silicio monocristalino
Eficiencia nominal de las celdas	12 - 20%	12 - 20%	12 - 20%
Potencia de toda la matriz	Mín. 300 W Máx. 500 W	Mín. 480 W Máx. 800 W	Mín. 600 W. Máx. 1000 W.
Material frontal	Cristal templado prismático o texturizado		
Material del marco	Aluminio anodizado		
Peso	Máximo recomendado 30 kg. Toda la matriz fotovoltaica		
Temperatura de operación	-40 °C +85 °C		

Elaborado: Autor.

El número de módulos a utilizar depende de la potencia de cada uno y del área geométrica disponible. Es importante mencionar que los módulos fotovoltaicos pueden conectarse en serie o en paralelo.

En el primer caso el arreglo permite elevar la tensión a corriente constante, mientras que cuando se asocian en paralelo se incrementa la corriente y la tensión se mantienen constante. En ambos casos se incrementa la potencia.

Figura 15. Arreglo con módulos FV conectados en serie.



Fuente: Alternative Energy Tutorials (2017).

En el Anexo D se presenta un catálogo de paneles fotovoltaicos.

3.2.4 Baterías

Se estima una utilización diaria máxima de 6 horas al día del vehículo solar evolución. La demanda energética corresponde a la potencia de la matriz fotovoltaica multiplicado por el tiempo estimado de uso diario, mientras que los días de autonomía se relacionan con el tiempo en el cual no se podrá alimentar a las baterías pero que estas deberán contar con la energía almacenada.

$$D_e = t \cdot C_i \quad (1)$$

$$C_{bat} = \frac{D_e \cdot d_a}{PdD \cdot V_s} \quad (7)$$

Los valores de la demanda energética se determinan con base en el tiempo estimado de uso por día y de la potencia instalada para la matriz fotovoltaica. Una vez que se conoce la demanda, se procede a determinar la capacidad de las baterías, con base en los días de autonomía de la matriz FV (que se consideró de 2 días para asegurar el funcionamiento en un caso extraordinario).

Por otro lado, se toma en cuenta la profundidad de descarga de la batería (que depende del tipo y el voltaje o tensión del sistema (que puede ser de 12, 24, 36 o 48 V).

En el caso de las baterías disponibles en el mercado son de ión-litio, plomo ácido solar abiertas, plomo ácido sellado, gel sellado (Plomo Acido gelificado cerradas), AGM (Fibra de vidrio absorbido) libre mantenimiento. A continuación se presentan los valores sugeridos para el efecto:

Tabla 13. Alternativas de baterías solares para el almacenamiento energético.

Especificaciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Tipo	Ion-Litio	Plomo acido solar abierta	Plomo ácido sellada AGM	Plomo ácido sellada GEL
PdD	100%	50%	60%	60%
Tensión	12, 24, 36, 48 V.	12, 24, 36, 48 V	12, 24, 36, 48 V	12, 24, 36, 48 V
Potencia matriz FV	300W, 500 W, 480 W, 800 W, 600 W, 1000 W			

Especificaciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Demanda energética	$1\,800 \frac{W \cdot h}{día}, 3\,000 \frac{W \cdot h}{día}, 2\,880 \frac{W \cdot h}{día}, 4\,800 \frac{W \cdot h}{día}, 3\,600 \frac{W \cdot h}{día}, 6\,000 \frac{W \cdot h}{día}$			
Días de autonomía	2	2	2	2
Capacidad	300 A·h (Ion-Litio, 12 V, 300 W) 250 A·h (Ion-Litio, 24 V, 500 W) 300 A·h (Ion-Litio, 24 V, 600 W) 250 A·h (Ion-Litio, 48 V, 1 000 W) 208,33 A·h (Plomo ácido sellada AGM, 12 V, 500 W) 666,67 A·h (Plomo ácido sellada AGM, 24 V, 800 W) 500 A·h (Plomo ácido sellada GEL, 12 V, 300 W) 500 A·h (Plomo ácido sellada GEL, 24 V, 600 W)			

Elaborado: Autor.

De entre las alternativas planteadas, se recomienda utilizar baterías solares de ión-litio, porque poseen un peso más liviano en comparación a las otras, además presentan un régimen de descarga del 100%, lo que permite prolongar su vida útil.

Con el objeto de incrementar la tensión de trabajo (en V.) se pueden hacer asociaciones de baterías en serie, mientras que para aumentar la capacidad de almacenamiento de la energía del sistema (en A.h) se pueden asociar baterías en paralelo. Existe también la opción de agrupar en serie y en paralelo a la vez, con el propósito de conseguir un efecto combinado.

3.2.5 Inversor

Los parámetros para el inversor están en dependencia de los establecidos para las baterías, en este caso se debe incrementar la potencia en un 25%, por la razón de que el rendimiento a la potencia nominal de un inversor oscila el 80%, como se mostró en la tabla 4. A continuación se presentan las especificaciones sugeridas para los inversores de corriente, partiendo de las potencias nominales establecidas para la matriz.

Tabla 14. Alternativas de baterías solares para el almacenamiento energético.

Especificaciones	Alternativa 1	Alternativa 2
Tipo	De onda senoidal	De onda no senoidal
Potencia matriz FV	300W, 500 W, 480 W, 800 W, 600 W, 1 000 W	
Potencia del inversor	375 W, 625 W, 600 W, 1 000 W, 750 W, 1 250 W	
Tensión de entrada	12 V, 24 V, 36 V, 48 V DC	
Tensión de salida	220 VAC \pm 3%	

Elaborado: Autor.

3.2.6 Motor

Los motores a utilizar son eléctricos, de entre los cuales se pueden considerar varios tipos, como los siguientes: de corriente continua de imán permanente sin escobilla, de corriente alterna asíncrono (de inducción), de corriente alterna síncrono de rotor bobinado o síncrono de imanes permanentes. En la tabla 15 se presentan los cálculos respectivos para cada caso:

Tabla 15. Alternativas de motores eléctricos para vehículo solar.

Especificaciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Tipo	Corriente continua de imán permanente sin escobillas	Corriente alterna asíncrono (de inducción)	Corriente alterna síncrono de rotor bobinado	Corriente alterna síncrono de imanes permanentes
Potencia	Mínima 746 W (1 hp) Máxima 2 240 W (3 hp)	Mínima 746 W (1 hp) Recomendado 2 240 W (3 hp) Máxima 3 750 W (5 hp)	Mínima 746 W (1 hp) Recomendado 2 240 W (3 hp) Máxima 3 750 W (5 hp)	Mínima 746 W (1 hp) Recomendado 2 240 W (3 hp) Máxima 3 750 W (5 hp)
Tensión	12, 24, 36, 48 V	110, 220 V	110, 220 V	110, 220 V
Velocidad de rotación	3 000– 17 500 rpm	1 700 rpm	1 700 rpm	1 700 rpm

Elaborado: Autor.

Se debe tener en consideración que las eficiencias típicas oscilan entre 92 y 95%, y que el peso suele ser de entre 12 y 16 kg (Watkins y Humphris 2002). Por ende, se recomienda seleccionar un motor cuya potencia sea ligeramente menor o igual a 3 hp (2240 W).

En tanto que el tipo de motor puede ser uno de los que se indican a continuación: De corriente continua de imán permanente sin escobilla, de corriente alterna asíncrono (de inducción), de corriente alterna síncrono de rotor bobinado o de corriente alterna síncrono de imanes permanentes.

Al analizar la tabla 15 se puede identificar que el dimensionamiento no depende del tipo. Sin embargo, se sugiere utilizar los motores de corriente alterna síncronos de imanes permanentes, por su bajo peso y porque tienen la capacidad de montarse directamente a las ruedas.

3.2.7 Mecanismo de transmisión

Datos:

$$v = 50 \frac{km}{h} = 13,89 \frac{m}{s} \rightarrow \text{velocidad media}$$

$$m = 200 \text{ kg.}$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$P = F \cdot v \quad (8)$$

$$\text{Par de rodadura} = C_{rr} \left(1 + \frac{v}{161} \right) W \quad (13)$$

Tabla 16. Pares referenciales de rodadura y de superación de pendientes.

Especificaciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Potencia	Mínima 746 W (1 hp) Máxima 2 240 W (3 hp)	Mínima 746 W (1 hp) Recomendado 2 240 W (3 hp) Máxima 3 750 W (5 hp)	Mínima 746 W (1 hp) Recomendado 2 240 W (3 hp) Máxima 3 750 W (5 hp)	Mínima 746 W (1 hp) Recomendado 2 240 W (3 hp) Máxima 3 750 W (5 hp)
Velocidad lineal	Mín. 30 km/h (8,33 m/s) Media 50 km/h (13,89 m/s) Máx. 120 km/h (33,33 m/s)			
Fuerza motriz media	53,71 N 161,27 N	53,71 N 161,27 N 269,98 N	53,71 N 161,27 N 269,98 N	53,71 N 161,27 N 269,98 N
Masa máxima del vehículo	200 kg.	200 kg.	200 kg.	200 kg.
Peso máximo del vehículo	1 960 N	1 960 N	1 960 N	1 960 N
Coefficiente de resistencia a la rodadura	0,004 – 0,005	0,004 – 0,005	0,004 – 0,005	0,004 – 0,005
Par de rodadura	10,27 – 12,84 Nm	10,27 – 12,84 Nm	10,27 – 12,84 Nm	10,27 – 12,84 Nm
Radio de la rueda	20 - 32 cm.	20 - 32 cm.	20 - 32 cm.	20 - 32 cm.
Pendiente al arranque	14% (12,6°)	14% (12,6°)	14% (12,6°)	14% (12,6°)
Par de superación de pendiente	57,26 Nm (masa de 200 kg, pendiente del 14%, radio de la rueda 20 cm) 91,62 Nm (masa de 200 kg, pendiente del 14%, radio de la rueda 32 cm)			

Elaborado: Autor.

3.2.8 Presupuesto

La implementación del vehículo solar evolución para la competición Carrera Solar Atacama demanda de la inversión de un egreso económico importante. Por esto motivo es conveniente detallar los costos referenciales asociados a la adquisición de los principales componentes del vehículo solar.

A continuación en la tabla 17 se describen los componentes y los costos referenciales de los mismos, para el mercado ecuatoriano:

Tabla 17. Presupuesto de adquisición de los componentes del vehículo solar evolución.

Componente	Detalle	Valor Unitario (\$)
Panel solar	Monocristalino 25 Wp*, 17.5 V – 1.43 A	39.00
	Policristalino 50 Wp, 18 V – 2.77 A	64.90
	Policristalino 50 Wp 17.5V – 2.86 A Dimensiones: 670 x620 x35mm, aluminio anodizado	90.00
	Monocristalino 150 Wp 12 V 8.42 A Dimensiones: 1482 x 676 x 35mm 36 celdas	200.00
	Monocristalino 200 Wp 24 V 5.41 A Dimensiones: 1580 x 808 x 50mm 72 celdas	265.00
	Monocristalino 250 Wp 24 V 6.91 A 1640 x 992 x 40mm 72 celdas	320.00
Batería solar	Marca: Marca SBB Sunbright Battery Plomo acido sellada GEL 150 A.h 12V DC 47 kg.	440.00
	Marca: Marca SBB Sunbright Battery Plomo acido sellada GEL 100 A.h 12V DC 31kg.	300.00
	Marca: Marca SBB Ultracell Plomo acido sellada GEL 150 A.h 12V DC 44 kg.	490.00
Inversores de corriente	Marca Powerstar 12VDC a 110V 1000W	450.00
	Marca Powerstar 24VDC a 220V 1000W	450.00
	Marca Powerstar 48VDC a 220V 2000W	700.00

Elaborado: Autor.

3.3 Conclusiones

- La captación de la energía en los vehículos solares se realiza a través de la utilización de varios componentes tales como: una matriz fotovoltaica conformada por celdas, una o más baterías para almacenamiento energético y un inversor de corriente continua a alterna. A su vez, la energía eléctrica posteriormente es convertida en energía mecánica mediante un motor de corriente alterna o continua, que es el elemento que transfiere el movimiento al auto solar.
- Con el propósito de poder diseñar un prototipo de vehículo para la categoría evolución en la Carrera Solar de Atacama, se estudiaron los parámetros de interés como son la radiación solar, la demanda energética, la capacidad de energía disponible, que para el lugar de la competencia fue de $9.07 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2/\text{día}$ para el período comprendido entre los años 2004 - 2016, la irradiancia de $1\,000 \text{ W}/\text{m}^2$, la eficiencia de los paneles fotovoltaicos que oscila entre 12 y 20%, los materiales de fabricación que difieren para cada componente, el tipo de corriente continua o alterna, las potencias de trabajo que pueden oscilar entre 300 y 1 200 W para las celdas fotovoltaicas, entre otros.
- A partir de los resultados, se definió que los tipos de celdas fotovoltaicas más idóneos son las de Silicio monocristalino y policristalino, por el hecho que presentan las más altas eficiencias, cuyos valores oscilan entre el 12% y el 20%, además de que son los tipos más comunes en el mercado.
- Las baterías son indispensables para el funcionamiento de los vehículos solares, debido a que la magnitud de la radiación es variable y sobre todo por la gran demanda energética que requiere un auto de competencia, dado que debe vencer varias fuerzas resistivas como las de rodadura, de la oposición de las pendientes y obstáculos.
- El inversor de corriente convierte la energía eléctrica de continua en alterna, al encontrarse almacenada en las baterías, de modo que sea utilizable en un motor con potencias establecidas entre 1 y 5 hp.

3.4 Recomendaciones

- Diseñar un vehículo solar para la categoría evolución que cumpla con las especificaciones establecidas en las bases de la competición de la Carrera Solar de Atacama, así como de las formuladas en el presente trabajo, con el propósito de acogerse al reglamento.
- Seleccionar la alternativa que represente los menores costos, contribuya a disminuir el peso del vehículo, favorezca la adquisición de los componentes, trabaje con las mayores eficiencias, entre otros criterios similares de decisión.
- Para la disposición de los paneles solares tomar en cuenta el área que se asigne a la matriz fotovoltaica que no puede ser mayor a 6 m^2 , así como también la potencia de las celdas y la potencia total requerida; todo esto condiciona la forma como se deben agrupar o conectar los módulos, ya sea en serie o en paralelo. En cuanto a los materiales de los paneles se debe escoger entre los de silicio monocristalino o policristalino.
- Considerar de preferencia baterías de ión - litio, porque son más livianas que las demás y presentan un régimen de descarga del 100%, lo que permite prolongar su vida útil.
- Para la selección del motor eléctrico tener en consideración la potencia requerida, con el objeto de no sobredimensionar el sistema, pero que al mismo tiempo esté en capacidad de solventar la necesidad de vencer las fuerzas resistivas. Las baterías deben ser seleccionadas con los criterios de potencia y tensión disponible, además de la capacidad de almacenamiento, el régimen de descarga y de no exceder un peso que permita que todo el vehículo no sobrepase los 200 kg.

GLOSARIO

Batería. Es un dispositivo encargado de convertir la energía química de sus componentes activos en energía eléctrica, mediante una reacción electroquímica producida en el traslado de electrones desde un material a otro, en un circuito eléctrico.

Capacidad nominal de la batería. Es la cantidad máxima de energía que se puede extraer de una batería a cierta velocidad, esta magnitud también es denominada capacidad de régimen de la batería. Por lo general, la capacidad estándar de una batería solar se presenta con un régimen de descarga de 20 horas.

Etapas. En una competencia, es el conjunto de tramos que los equipos deben recorrer en un día de competencia.

Pérdida de operación. Es la condición en que un dispositivo deja de funcionar debido a una falla, desconexión o a un agotamiento de la fuente de energía.

Profundidad de descarga PdD de una batería. Es el porcentaje energético que se extrae de una batería, relacionada con su capacidad energética total.

Régimen de carga. Es la velocidad con la que se recarga una batería. Se expresa como la razón entre la capacidad y el flujo de la corriente que ingresa a una batería.

Régimen de descarga. Es la velocidad de extracción de corriente de una batería. Se expresa como la relación entre la capacidad y la corriente que sale de una batería.

BIBLIOGRAFÍA

ABAL, G. *Fundamentos de Energía Solar. Radiación Solar.* Montevideo, 2012. pp. 25.

CHEN, C. J. *Physics of Solar Energy.* Department of Applied Physics and Applied Mathematics Columbia University. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011. pp. 1.

CARREÑO, E., et al. Diseño y fabricación de un vehículo autónomo impulsado por energía solar. *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento* [en línea], vol. 16, no. 32, pp. 91-106. [Consulta: 4 mayo 2017]. ISSN 0123-921X. 2012 Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3957091>.

AUTOSOLARUDEC. Proyectos actualmente desarrollados por nuestro Equipo [en línea]. [Consulta: 26 abril 2017]. 2015. Disponible en: <http://autosolarudec.cl/proyectos.html>.

GONZALEZ-LOGATT, Francisco. *Introducción a los sistemas de potencia.* 2008. pp. 57.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CANARIAS. *Guía didáctica de Energía Solar. Coche fotovoltaico.* Las Palmas de Gran Canaria, 2008.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CANARIAS S.A. *Coche fotovoltaico.* Las Palmas de Gran Canaria, 2007.

MIDUVI Y CÁMARA DE LA CONSTRUCCIÓN DE QUITO. *Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-11 Capítulo 14. Energías Renovables.* Quito: Decreto Ejecutivo N° 705, 2011.

MINISTERIO DE ENERGÍA DEL GOBIERNO DE CHILE. Explorador Solar para Autoconsumo. [En línea] Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 15 de Diciembre de 2016. [Citado el: 15 de Diciembre de 2016.]

MYERS, D.R., EMERY, K. & GUEYMARD, C. Revising and Validating Spectral Irradiance Reference Standards for Photovoltaic Performance Evaluation. *Journal of Solar Energy Engineering* [en línea], vol. 126, no. 1, pp. 567. [Consulta: 4 mayo 2017]. ISSN 01996231. DOI 10.1115/1.1638784., 2004. Disponible en: <http://SolarEnergyEngineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1456913>.

MOYANO, M. C. & IÑIGO, G. A. *Auto Solar.* Ciencia y Tecnología de la Nación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica Ministerio de Educación. 1. Buenos Aires: MDC MACHINE S. A., pp. 35-36. ISBN 950-00-0531-X. 2006.

A. NADER, N., GHONEIM, M. & S. ALSAYED, R. Designing, Building of Solar Race Car for the World Solar Challenge (Phase I). *Universal Journal of Mechanical Engineering* [en línea], vol. 3, no. 4, pp. 122-130. [Consulta: 26 abril 2017]. ISSN 2332-3353, 2332-3361. DOI 10.13189/ujme.2015.030402. Disponible en: http://www.hrpub.org/journals/article_info.php?aid=2676.

ONG LA RUTA SOLAR. *Bases Técnicas CSA Evolución.* 2016. pp. 8-19.

RAMÍREZ, L. *Diseño e implementación del sistema solar fotovoltaico para una tricicleta híbrida impulsada por energía solar.* [en línea]. Proyecto de Titulación previo la obtención del Título de Ingeniero Electromecánico. Latacunga, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. [Consulta: 8 mayo 2017]. 2015. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/9915>.

SIMEC CHILE SRL. *Proyecto de inserción de SIMEC CHILE SRL en el mercado.* 2009.

SUNIL, Y. & SINHA, A. Solar Powered Vehicle. *World Congress on Engineering and Computer Science WCECS*. San Francisco, USA, vol 2, pp. 4. ISBN 978-988-18210-0-3, 2010.

WATKINS, S. & HUMPHRIS, C. Solar vehicles: The challenge of maximum speed from minimal power. *FEDSM2002-31245* [en línea]. Montreal, Quebec, Canada, pp. 1-6., 2002. Disponible en: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/pdfaccess.ashx?url=/data/conferences/fedsm2002/69701/ on 05/03/2017>.